



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Doctorado

Estudio del comportamiento térmico de un edificio
no residencial con techo ventilado

presentada por

MC. Araceli Ávila Hernández

como requisito para la obtención del grado de
**Doctora en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis
Dr. Efraín Simá Moo

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2023.



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., a 31 de julio de 2023

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

AT'n: **DR. JORGE COLÍN OCAMPO**
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL
DEL DEPARTAMENTO DE ING. MECÁNICA

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la estudiante **Araceli Ávila Hernández** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado "**Estudio del comportamiento térmico de un edificio no residencial con techo ventilado**" realizado bajo la dirección de Dr. Efraín Simá Moo, el trabajo se **ACEPTA** para proceder a su impresión.

ATENTAMENTE

DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA
CENIDET

DR. JESÚS ARCE LANDA
CENIDET

DR. MIGUEL ÁNGEL CHAGOLLA ARANDA
CENIDET

DR. JORGE OVIDIO AGUILAR AGUILAR
UQROO

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
CENIDET

c.c.p: Mtra. Ma. Elena Gómez Torres jefa del Departamento de Servicios Escolares
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza Subdirector Académico
c.c.p: Expediente

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico

PREMIO ESTATAL
AHORRO
de ENERGÍA
MORELOS
2015



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos
Tel. 01 (777) 3627770, ext. 1408, e-mail: dim_cenidet@tecnm.mx | tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



2023
AÑO DE
Francisco
VILLA
EL REVOLUCIONARIO DEL SUR



Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

03/agosto/2023
SAC/126/2023
Autorización de
impresión de tesis

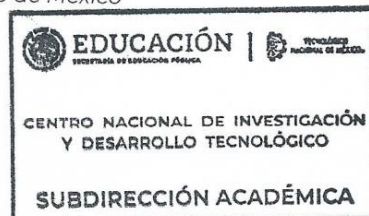
ARACELI ÁVILA HERNÁNDEZ
CANDIDATA AL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **“Estudio del comportamiento térmico de un edificio no residencial con techo ventilado”**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

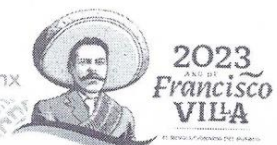
Excelencia en Educación Tecnológica®
“Conocimiento y tecnología al servicio de México”



CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

C. c. p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo económico y seguro médico brindado durante el desarrollo de mi tesis doctoral.

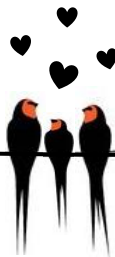
Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por permitirme realizar mis estudios de posgrado.

A mi esposo, amigo, colaborador y cómplice por estar presente en los momentos en que el estudio y el trabajo ocuparon mi tiempo. Tu ayuda, amor y paciencia ha sido fundamental para la culminación de este trabajo.

Al Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor por sus enseñanzas, por su apoyo y consejo en los temas académicos y personales. Gracias por transmitirme la honestidad, dedicación, el amor y la pasión por la ciencia.

A mi asesor y revisores por sus comentarios y retroalimentación en la revisión de este trabajo.

A la Sra. Rocío por su apoyo durante mi estancia y proceso de titulación.



Índice

Lista de Figuras	IV
Lista de Tablas	VIII
Nomenclatura	X
Resumen	XIII
Abstract	XV
1 Introducción	1
1.1 Problemas ambientales y energía en edificaciones.....	1
1.1 Estado del arte.....	6
1.2 Objetivo.....	18
1.2.1 Objetivos específicos	18
1.3 Alcance	18
1.4 Descripción de los capítulos	19
2 Modelos físicos y matemáticos	21
2.1 Modelo físico de un techo tradicional	21
2.2 Modelo físico de un techo ventilado.....	23
2.3 Modelo físico de un techo verde	24
2.4 Modelo físico de un techo ventilado verde.....	26
2.5 Características de los softwares usados	30
2.5.1 EnergyPlus.....	30
2.5.2 DesignBuilder.....	41
3 Desarrollo experimental	44
3.1 Etapa I. Selección de la vegetación.....	45
3.1.1 Construcción de los soportes para la vegetación	49
3.1.2 Plantación de la vegetación.....	49

3.1.3	Instrumentación de los techos ventilados-verdes.....	51
3.1.4	Resultados experimentales de la evaluación de la vegetación	53
3.1.5	Conclusiones de la etapa I.....	67
3.2	Etapa II. Construcción de módulos de prueba.....	67
3.2.1	Construcción de los módulos de prueba.....	68
3.2.2	Construcción de los techos ventilados.....	74
3.2.3	Instrumentación de los módulos de prueba	79
3.2.4	Resultados experimentales de los módulos de prueba	84
3.2.5	Conclusiones de la etapa II.....	97
3.3	Etapa III. Validación/calibración del modelo energético/físico en el software.....	97
3.3.1	Cálculo del error en la validación	103
3.3.2	Resultados de la validación.....	105
3.3.3	Conclusiones de la etapa III	115
4	Caso de estudio	116
4.1	Condiciones ambientales.....	116
4.2	Edificio no residencial para la simulación	118
4.2.1.	Zonas térmicas	124
5	Resultados de la simulación.....	126
5.1	Simulación del edificio en evolución libre.....	128
5.1.1	Parámetros de simulación y consideraciones.....	128
5.1.2	Temperatura interna de las zonas del cuarto nivel	131
5.1.3	Temperatura interna del cuarto nivel con los diferentes techos.....	132
5.1.4	Temperatura de la superficie exterior de la losa.....	134
5.1.5	Comportamiento semanal del edificio	136
5.1.6	Conclusiones de la simulación en evolución libre.....	143
5.2	Simulación del edificio con el sistema de enfriamiento.....	144
5.2.1	Parámetro de simulación y consideraciones	144
5.2.2	Temperatura interna y demanda energética por zonas.....	144
5.2.3	Demanda energética total con los diferentes tipos de techos.....	152

5.2.4	Conclusiones de la simulación con el sistema de enfriamiento.....	154
5.3	Análisis costo beneficio.....	155
5.3.1	A Conclusiones del análisis costo beneficio	163
6	Conclusiones y recomendaciones	164
6.1	Conclusiones	165
6.2	Recomendaciones	167
7	Referencias bibliográficas	168
8	Apéndice	181
A.	Clasificación de los techos ventilados.....	182
B.	Fichas bibliográficas de los artículos revisados.	185
C.	Planos del edificio Unidad Académica 1 de Cenidet.....	213
D.	Publicaciones	217

Lista de Figuras

Figura 1.1 Técnicas pasivas de acondicionamiento térmico.	5
Figura 1.2 Clasificación de los techos ventilados.....	12
Figura 1.3 Clasificación de la infraestructura verde.....	16
Figura 2.1 Modelo físico de un techo tradicional.....	22
Figura 2.2 Modelo físico de un techo ventilado.....	24
Figura 2.3 Modelo físico de un techo verde.....	26
Figura 2.4 Modelo físico de un techo ventilado verde.....	27
Figura 2.5 Intercambio energético en la edificación.	31
Figura 2.6 Balance de calor en la zona térmica.	38
Figura 2.7 Diagrama de flujo del funcionamiento de la simulación.....	43
Figura 3.1 Planta Llaruada Sudamericana.....	47
Figura 3.2 Planta Cissus antártica	47
Figura 3.3 Planta Trompeta azul	48
Figura 3.4 Planta Jazmín amarillo	48
Figura 3.5 Bases para la vegetación del techo ventilado-verde.....	49
Figura 3.6 Plantación de la vegetación: (a) macetas colocadas en cada esquina, (b) vegetación plantada, (c) vegetación orientada al centro, (d) macetas pintadas de blanco.....	51
Figura 3.7 Posición de los sensores en el techo ventilado-verde.....	52

Figura 3.33 Instalación experimental con los módulos de prueba.....	83
Figura 3.34 Variables climáticas del monitoreo de los módulos.	85
Figura 3.35 Comportamiento semanal de la temperatura interna.	87
Figura 3.36 Comportamiento semanal de la temperatura de la losa.	89
Figura 3.37 Comportamiento semanal de la temperatura en la superficie interior y exterior de los techos ventilados.....	91
Figura 3.38 Temperatura del día más frío: (a) interna, (b) de la losa, (c) de las superficies del techo ventilado, (d) del canal de aire.	94
Figura 3.39 Temperatura del día más cálido: (a) interna, (b) de la losa, (c) de las superficies del techo ventilado, (d) del canal de aire.	96
Figura 3.40 Diagrama de flujo de la metodología de calibración.....	99
Figura 3.41 Módulos virtuales con techo ventilado de lámina y vegetación.....	103
Figura 3.42 Variables climáticas para la validación.	106
Figura 3.43 Temperatura del techo tradicional, datos medidos y simulados.....	108
Figura 3.44 Temperatura del techo ventilado con lámina: (a) Superficie exterior de la lámina y de la losa, (b) interior del módulo y canal de aire.	110
Figura 3.45 Temperatura del techo ventilado con teja: (a) Superficie exterior de la teja y de la losa, (b) interior del módulo y canal de aire.....	112
Figura 3.46 Temperatura del techo ventilado con vegetación: (a) Superficie exterior de la vegetación y de la losa, (b) interior del módulo y canal de aire.	114
Figura 4.1 Variables climáticas para la simulación del edificio.....	118
Figura 4.2 Ubicación del edificio simulado.	119
Figura 4.3 Ubicación de las aberturas del edificio.....	121
Figura 4.4 Zonas térmicas del 4to nivel (vista posterior).	124
Figura 4.5 Disminución de zonas térmicas.....	125
Figura 5.1 Área libre y ocupada del techo del edificio de Cenidet.	127
Figura 5.2 Trayectoria solar, desde una vista superior y posterior del edificio.	130

Figura 5.3 Temperatura promedio mensual para cada zona	132
Figura 5.4 Temperatura interna del 4to nivel con los diferentes techos.....	133
Figura 5.5 Temperatura de la superficie exterior de la losa para cada configuración ...	135
Figura 5.6 Temperatura interna del 4to nivel con los diferentes techos.....	138
Figura 5.7 Temperatura de la superficie de la losa con los diferentes techos.....	140
Figura 5.8 Comportamiento diario de la temperatura: (a) interna, (b) superficie exterior de la losa.	142
Figura 5.9 Demanda de energía para enfriamiento del techo tradicional.....	146
Figura 5.10 Demanda de energía para enfriamiento del techo con lámina.	148
Figura 5.11 Demanda de energía para enfriamiento del techo con teja.	150
Figura 5.12 Demanda de energía para enfriamiento del techo con vegetación.	151
Figura 5.13 Demanda de energía para enfriamiento de cada techo.....	153

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las tecnologías verdes.	29
Tabla 3.1 Criterios de evaluación para seleccionar la vegetación adecuada.	66
Tabla 3.2 Valores puntuales de las variables climáticas.	85
Tabla 3.3 Parámetros libres para la calibración.....	102
Tabla 3.4 Componentes de construcción de los módulos experimentales.....	102
Tabla 3.5 Valores límite de índice de error horario para modelos simulados.....	105
Tabla 3.6 Mínimos y máximos de las variables climáticas.	107
Tabla 3.7 Índices de error para el techo ventilado con tradicional.	108
Tabla 3.8 Índices de error para el techo ventilado con lámina.	111
Tabla 3.9 Índices de error para el techo ventilado con teja.	113
Tabla 3.10 Índices de error para el techo ventilado con vegetación.	115
Tabla 4.1 Variables ambientales mensuales.....	117
Tabla 4.2 Descripción del edificio.	120
Tabla 4.3 Posición y área de las aberturas.	122
Tabla 4.4 Propiedades del vidrio.....	123
Tabla 4.5 Propiedades termofísicas de los materiales de construcción.	123
Tabla 4.6 Características de las zonas térmicas.....	125
Tabla 5.1 Intervalos mensuales de la temperatura de confort.	129

Tabla 5.2 Temperatura interior mensual del 4to nivel del edificio, para las diferentes configuraciones.....	134
Tabla 5.3 Temperatura mensual de la superficie exterior de la losa, para las diferentes configuraciones.....	136
Tabla 5.4 Temperatura interior del 4to nivel del edificio con las diferentes configuraciones	139
Tabla 5.5 Temperatura de la superficie de la losa horaria con las diferentes configuraciones.....	140
Tabla 5.6 Temperatura del aire interior con techo tradicional.....	146
Tabla 5.7 Temperatura del aire interior con techo de lámina.	148
Tabla 5.8 Temperatura del aire interior con techo de teja.	149
Tabla 5.9 Temperatura del aire interior con techo con vegetación.	151
Tabla 5.10 Cargas térmicas de refrigeración de cada techo.....	153
Tabla 5.11 Costos de los techos ventilados.	159
Tabla 5.12 Costos mensuales de electricidad.	160
Tabla 5.13 Periodo de recuperación de la inversión.....	161
Tabla 5.14 Indicadores de rentabilidad económica de los sistemas de techos ventilados.	162
Tabla 5.15 Emisiones de CO ₂ con cada configuración de techo.....	163

Nomenclatura

Símbolo **Descripción**

Latinas

A	Área de la superficie (m ²)
A_o	Ángulo de incidencia de los rayos del sol (°)
C_p	Calor específico del aire interno (J/(kg·K))
F_{air}	Factor de vista de la superficie al aire
F_{gnd}	Factor de vista de la superficie al suelo
F_{sc}	Factor de vista entre la superficie y el cielo
F_{sg}	Factor de vista entre la superficie y suelo
F_{sky}	Factor de vista de la superficie al cielo
h_{ext}	Coefficiente convectivo exterior (W/m ² K)
h_i	Coefficiente convectivo interior (W/m ² K)
I_b	Radiación directa (W/m ²)
I_g	Radiación reflejada (W/m ²)
I_s	Radiación difusa (W/m ²)
\dot{m}_i	Flujo masico de aire interno (kg/h)
\dot{m}_{inf}	Flujo másico del aire infiltrado (kg/h)
\dot{m}_{sys}	Flujo másico de aire que sale del sistema de climatización (kg/h)
q_{air}''	Flujo de calor radiativo con el aire (W/m ²)

$q_{conv,i}''$	Flujo de calor convectivo interior (W/m ²)
$q_{conv,o}''$	Flujo de calor convectivo exterior (W/m ²)
q_{gnd}''	Flujo de calor radiativo con el suelo (W/m ²)
\dot{Q}_i	Flujo de calor total de los equipos eléctricos y/o personas (W/m ²)
q_{inf}''	Flujo de calor convectivo de la infiltración (W/m ²)
q_{ki}''	Flujo de calor conductivo hacia el interior (W/m ²)
q_{ko}''	Flujo de calor conductivo hacia el exterior (W/m ²)
q_{LWR}''	Flujo de calor radiativo de onda larga hacia el interior (W/m ²)
q_{LWS}''	Flujo de radiación de onda larga de equipo electrónico y el personal de la habitación (W/m ²)
q_{LWX}''	Flujo de calor radiativo de onda larga entre las superficies internas (W/m ²)
q_{sol}''	Radiación solar transmitida por las ventanas que se absorbe en la superficie (W/m ²)
q_{surf}''	Flujo de calor convectivo en la superficie interna (W/m ²)
q_{sys}''	Flujo de calor convectivo del sistema de climatización (W/m ²)
q_{sky}''	Flujo de calor radiativo con el cielo (W/m ²)
q_{SW}''	Flujo de calor radiativo de onda corta proveniente de las luces artificiales.
q_{zonas}''	Flujo de calor convectivo entre zonas (W/m ²)
q_{asol}''	Flujo de calor radiativo de onda corta hacia el interior (W/m ²)
S	Área total de la pared (m ²)
S_s	Área soleada del muro (m ²)
T_{air}	Temperatura del aire (°C)
T_{eq}	Temperatura de equipo eléctrico y personas (°C)
T_{gnd}	Temperatura del suelo (°C)

T_{sky}	Temperatura del cielo (°C)
T_{sumin}	Temperaturas del aire de suministro (°C)
T_{surf}	Temperatura de la superficie (°C)
T_z	Temperatura del aire de la zona (°C)
T_{∞}	Temperaturas del aire exterior (°C)
X_j	Coficiente de CTF al exterior
Y_j	Coficiente de CTF a través del muro
Z_j	Coficiente CTF al interior

Griegas

ε	Emisividad
σ	Constante de Stefan-Boltzmann
α	Absortividad
Φ_j	Coficiente de CTF del flujo

Resumen

Se analizó el comportamiento térmico, energético, ambiental y económico de un edificio no residencial con techo tradicional y tres tipos de techo ventilado: lámina galvanizada, teja de barro y vegetación. Para ello, se realizaron una serie de experimentos divididos en tres etapas: en la Etapa I, se pusieron a prueba cuatro plantas (*Cissus Antártica*, *Pyrostegia Venusta*, *Jasminum Mesnyi* y *Thunbergia laurifolia*) para seleccionar la más resistente a las condiciones climáticas, y la mejor opción resultó ser la *Cissus Antártica*. En la Etapa II, se construyeron cuatro módulos de prueba, uno con losa tradicional y tres con techo ventilado. La planta seleccionada en la etapa I se usó para formar el techo ventilado-verde. En la Etapa III, se validó el modelo energético/físico de los módulos experimentales dentro del software DesignBuilder, esto con la finalidad de encontrar los parámetros desconocidos que representen la cubierta vegetal.

Una vez calibrado el modelo energético de las celdas experimentales se usaron los parámetros encontrados para simular el techo ventilado-verde en una edificación no residencial. La simulación del edificio se realizó en evolución libre y con un sistema mecánico de refrigeración, y no se consideraron cargas térmicas internas, iluminación, sombreados de árboles, edificios o cortinas en las ventanas. El periodo de simulación fue de un año para las condiciones climáticas de la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Los resultados indican que el uso de un techo ventilado ayudó a disminuir la temperatura interior y de la losa de la edificación. Se encontró que el techo ventilado con teja de barro, logró disminuir la temperatura en promedio anual 1 °C en el aire interior y 5.8 °C en la superficie exterior de la losa, respecto al tradicional. Los techos ventilados también lograron reducir la demanda de energía para refrigeración en 25.4% con el techo de teja, 21.9% con el de vegetación y 15.7% el de lámina, respecto al techo de referencia. Finalmente, en el aspecto monetario, el techo con teja logró un ahorro de 25.4%, el techo con lámina un 15.7% y el techo con vegetación 12.9%, respecto al techo tradicional, por el uso de energía eléctrica.

Abstract

The thermal, energetic, environmental and economic behavior analysis of a non-residential building with a traditional roof and three different types of ventilated roof: galvanized sheet, clay tiles and vegetation were carried out. To perform the analysis, a series of experiments divided into three stages were carried out: in Stage I, four plants (*Cissus Antarctica*, *Pyrostegia Venusta*, *Jasminum Mesnyi* and *Thunbergia laurifolia*) were put to the test to select the most resistant to the desired climatic conditions, and the best option turned out to be *Cissus Antarctica*. In Stage II, four test modules were built, one with a concrete slab (traditional roof) and three with a ventilated roof. Then, the plant selected in stage I was used in the ventilated-green roof. In Stage III, the energetic/physical model of the experimental modules was validated using the DesignBuilder software, in order to find the unknown parameters of the vegetal cover.

Once the energy model of the experimental modules had been calibrated, the parameters found were used to simulate the green-ventilated roof in a non-residential building. The simulation of the building was carried out in free evolution and with a mechanical cooling system, and the internal thermal loads caused by lighting, shading from trees, buildings or window shades were not considered. The simulation period was one year for the climatic conditions of the city of Cuernavaca, Morelos.

The results show that the use of a ventilated roof helped to reduce the interior and concrete slab temperature of the building. It was found that the ventilated roof with clay tile managed to reduce the temperature on an annual average of 1 °C in the interior air and 5.8 °C on the outer surface of the slab, compared to the traditional one. Ventilating roofs also managed to reduce energy demand for cooling by 25.4% with the tile roof, 21.9% with the vegetation roof, and 15.7% with the sheet roof, compared to the reference roof. Finally, in the monetary aspect, the tile roof achieved a saving of 25.4%, the sheet roof 15.7% and the vegetated roof 12.9%, compared to the traditional roof, due to the use of electrical energy.

Capítulo 1

Introducción

1.1 Problemas ambientales y energía en edificaciones

El desarrollo socioeconómico de cada país aumenta la urbanización año con año. La concentración de población y actividades económicas en el área urbana, ha tenido consecuencias insostenibles en el medio ambiente, la sociedad y la cultura. Se estima que para el 2050 la población que vive en las ciudades aumente un 67% de acuerdo con un estudio realizado por las Naciones Unidas (Raji et al., 2015). Al aumentar la población, el consumo de energía también aumenta, y a nivel global los sectores industrial y residencial son los principales consumidores de energía. El sector estudiado en esta tesis es el sector residencial, el cual ocupó el segundo lugar en consumo de energía con 29.7% de acuerdo con estadísticas para el año 2019 (International Energy Agency, 2021). Y específicamente, en países como Botsuana el consumo de energía en edificaciones representa el 50%, en Brasil el 42%, en Reino Unido el 39%, en España el 23%, en Japón el 25%, en China el 28%, en Suiza 47% (Zhang et al., 2016) y 17.56% para México (Secretaría de Energía, 2022). Desde el año 2010, a nivel mundial el sector residencial ha presentado un aumento en el consumo de electricidad, la cual se destina principalmente para iluminación, uso de electrodomésticos, agua caliente y sistemas de acondicionamiento de aire. Los equipos

mecánicos de acondicionamiento representan el 30% del total de electricidad consumida en la edificación (Contreras et al., 2022).

El sector de la construcción es un consumidor importante de energía y emisor de carbono, se construye un gran número de edificios poco eficientes y el ciclo de modernización o utilización de técnicas de ahorro de energía es lento, en consecuencia, los edificios tienen un impacto duradero en el consumo de energía y el medio ambiente. Los materiales utilizados en la construcción de edificios tienen la capacidad de absorber y retener gran cantidad de energía proveniente de la radiación solar y luego liberarla en las noches, alterando el clima a escala local y regional. La interacción de la edificación con el ambiente produce un intercambio energético, las ganancias y pérdidas de calor están influenciadas por la geometría, dimensión y materiales de construcción de la edificación, edificios vecinos, uso y ocupantes, además de la cantidad y dimensión de las aberturas, las cuales afectan principalmente la demanda de refrigeración, calefacción y ventilación (Gastines y Pattinia, 2020). Cada componente de la edificación aporta energía al recinto y de acuerdo a la CONUEE, el componente de la envolvente que mayor energía aporta a la edificación es el techo (Comisión Nacional para el uso Eficiente de la Energía, 2016), esta parte de la edificación ocupa alrededor del 20-25% de las superficies urbanas y su rendimiento se ve afectado por la absorción solar, hasta 1000 W/m² inciden sobre los techos, de los cuales del 20-95% de energía se absorbe en ellos (Qin et al., 2017).

Con el aumento de las edificaciones las áreas verdes se han visto afectadas, en las ciudades las superficies grises son predominantes y poco a poco las áreas verdes van disminuyendo, lo que provoca una reducción abrupta de la evapotranspiración, impidiendo que la humedad del ambiente ayude a bajar la temperatura del aire. En consecuencia, las pocas áreas vegetadas y las extensas áreas urbanas calientan el aire cercano a las edificaciones generando el fenómeno de la isla de calor urbana (Urban Heat

Island - UHI). Este fenómeno se caracteriza por la diferencia de temperatura ambiental entre las ciudades y las zonas rurales de hasta 8 °C, este aumento de temperatura en las ciudades afecta directamente las edificaciones al aumentar su temperatura interior (Gagliano et al., 2015). Con el aumento excesivo de la temperatura interior los ocupantes de las edificaciones entran en un estado de disconfort que altera la eficacia para realizar las actividades diarias, por lo que se buscan métodos para mantener la temperatura óptima dentro del recinto. Estos métodos generalmente son equipos eléctricos de climatización que ayudan a mantener la temperatura de confort, con el inconveniente de los elevados costos que presentan por el consumo de energía eléctrica en el tiempo de servicio. Los costos elevados se aprecian sobre todo en climas extremos, donde las temperaturas son muy altas o bajas. Sumado al impacto económico se genera el impacto ambiental por el uso excesivo de la energía, por esta razón se busca una edificación energéticamente más eficientemente, así se reducirá el consumo eléctrico y las emisiones contaminantes; manteniendo en lo posible el confort térmico de sus habitantes.

Una de las maneras de reducir el consumo eléctrico es mediante la arquitectura bioclimática, esta consiste en diseñar edificios tomando en cuenta las condiciones climáticas. Muchas construcciones tradicionales aprovechan los recursos naturales según las necesidades de los ocupantes, mediante la ubicación, la forma y diseño de los elementos constructivos. Sin embargo, en la actualidad, debido a los avances tecnológicos se han abandonado las prácticas basadas en el diseño pasivo y se han implementado cada vez más los sistemas mecánicos para obtener una temperatura de confort sin tener en cuenta las condiciones del lugar y el potencial del clima.

De acuerdo con la Figura 1.1 las técnicas pasivas se pueden dividir en tres grandes grupos: estrategias generales, estrategias para enfriamiento y estrategias para calentamiento. Las estrategias generales determinan la cantidad de radiación que recibirá la envolvente y

aunque son características importantes, no siempre se puede decidir la orientación de la vivienda, pues ya existe un conjunto de viviendas, calles y vialidades establecidas que impiden decidir por alguna orientación específica. También se encuentran las estrategias de calentamiento, donde por medio de la radiación solar se calienta el recinto con la ayuda de las ventanas, lucernarios, muros trombe, etc. Por último, las estrategias de refrigeración se utilizan sobre todo en climas cálidos, en esta categoría se pueden encontrar medidas de protección solar y medidas para inducir la ventilación, ambas estrategias ayudan a disminuir la temperatura interna y en la medida de lo posible mantener el confort térmico. Algunos ejemplos de técnicas pasivas de refrigeración son las chimeneas solares, torres de viento, huecos, vidrios inteligentes, techos frescos, infraestructura verde (techos y muros verdes), que es la aplicación de vegetación en techos, muros, balcones y jardines; y las fachadas y cubiertas ventiladas que mejoran el aislamiento térmico del edificio al evitar que la radiación incida directamente en la envolvente. Precisamente, en el análisis de los techos se centró esta tesis, ya que un techo puede contribuir hasta con el 50% de la ganancia total de energía, por lo tanto, este componente tiene un papel vital en el consumo de electricidad y gas de la edificación (May Tzuc et al., 2019). Por este motivo se analizó a detalle el comportamiento térmico de diferentes techos ventilados para conocer su desempeño bajo las condiciones climáticas de Cuernavaca, Morelos.

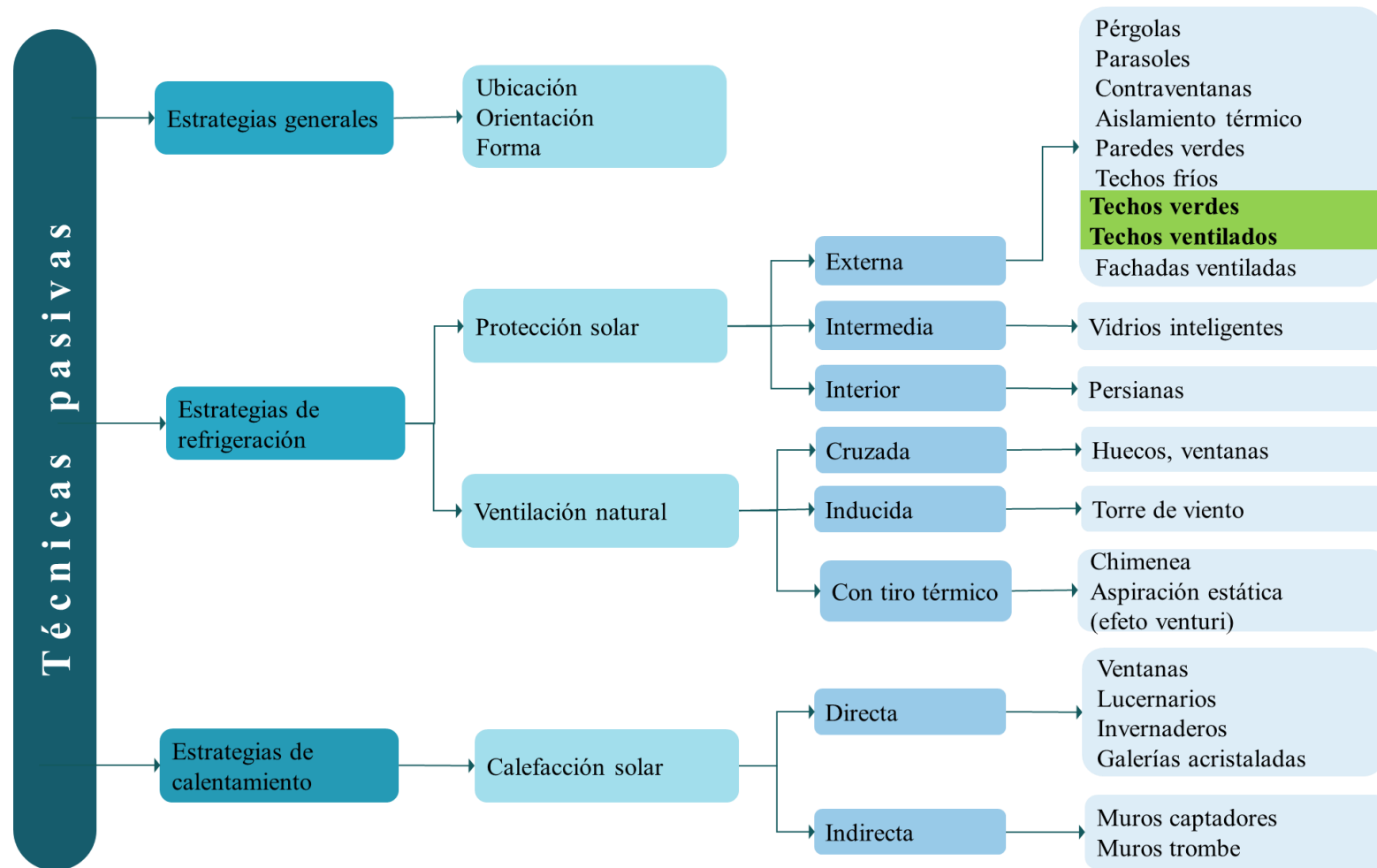


Figura 1.1 Técnicas pasivas de acondicionamiento térmico.

1.1 Estado del arte

Los techos ventilados están formados por dos techos, uno primario, que es el techo de la edificación y otro secundario que está sobre el techo primario, ambas estructuras forman entre ellos un canal de aire. La capa secundaria absorbe y bloquea la mayor parte de energía, ya que impide que la radiación incida directamente sobre el techo del edificio. El canal de aire ayuda a disipar el exceso de calor debido a la radiación solar, el cual es removido por el aire que pasa por el canal, dejando que solo un porcentaje menor se introduzca al interior de la edificación, mejorando no solo las condiciones de confort térmico, sino también el rendimiento energético de un edificio. Los techos ventilados pueden ser planos, inclinados, a dos aguas y de materiales variados. La mayoría de los estudios se centra en la comparación térmica y energética de un techo ventilado contra un techo tradicional, y dichos estudios pueden ser teóricos, experimentales y una combinación de ambos. En los trabajos donde se estudió un **techo ventilado plano** se han utilizado diferentes materiales para el techo secundario como el hormigón, concreto ferrocemento, espuma de poliestireno y lámina galvanizada; y el canal de aire varió desde los 2 a los 30 cm. Algunos investigadores acoplan al techo ventilado a otras tecnologías pasivas para que su rendimiento sea mayor. Como Zingre et al., (2015) quienes colocaron una capa de pintura fría al techo ventilado y al techo tradicional, y encontraron una reducción de temperatura de hasta 14.7 y 11.9 °C en el techo secundario y primario respecto al original sin pintura fría. Dimoudi et al. (2006) colocaron una barrera radiante al techo secundario, además de una chimenea circular de 35 cm de altura para facilitar la extracción del aire caliente del conducto ventilado, esta configuración logró reducir 8 °C para el techo ventilado sin barrera radiante y 14 °C con una barrera radiante. Tong et al. (2014) además de una barrera radiante también incluyó pintura fría y espuma de poliestireno expandido, los resultados arrojaron que la aplicación de la barrera radiante redujo las ganancias diarias de calor 84%, con poliestireno expandido un 73% y un 42%

para el techo ventilado simple. Otros autores agregaron material de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés) al techo ventilado para aumentar los beneficios térmicos, como Li et al. (2020) que compararon un techo ventilado convencional y un techo ventilado compuesto con PCM, este arreglo logró reducir la temperatura interior 44% con el techo ventilado con PCM, mientras que con el techo ventilado convencional se redujo 33%. Hou et al. (2021) realizaron una comparación entre un techo ventilado convencional y un techo ventilado con PCM y evaluaron tres modos de uso, resultando que la mejor opción es abrir periódicamente el canal de aire y usar un intercambiador de calor en el techo, lo que redujo la temperatura interior 8.2 °C o 47%. Godoy-Rangel et al. (2022) también agregaron PCM al techo ventilado y encontraron una reducción de la temperatura interior de entre 3-7% y una reducción de la carga de refrigeración del 6.8%. En los techos ventilados es de suma importancia el canal de aire, algunos investigadores evaluaron este espacio como Beltrán (2018) quien encontró el espacio óptimo del canal de aire de 10-11 cm para las ciudades de Mérida, Cd. Juárez y CDMX, esto permitió una reducción de temperatura de 14.4, 9 y 4 °C, respectivamente. May-Tzuc et al. (2019) concluyeron que el espesor óptimo fue de 11-13 cm y que la temperatura ambiente junto con el espesor del canal de aire son los componentes principales involucrados en el flujo de calor a través del techo ventilado. También hay techos ventilados con el canal de aire cerrado en su mayoría, solo se dejan pequeños orificios para la entrada y salida del aire, como el trabajo de Kovac y Vojtus (2015) quienes dejaron dos orificios de 6 cm para el ingreso y salida de aire, el estudio se realizó en invierno por lo que la temperatura en el techo secundario fue de 3.5 °C y la temperatura de la superficie exterior del techo primario de hasta 15 °C, lo que significa que el techo ventilado también protege la vivienda de bajas temperaturas. Estudios novedosos como el de Kharrufa y Adil (2012) quienes colocaron un estanque en el canal ventilado y se instaló un ventilador en un extremo del canal para forzar el movimiento del aire sobre la superficie del agua y que se enfrió por evaporación, este proceso logró reducir la temperatura del recinto 18.5 °C, respecto a la temperatura exterior. Chen et al.

(2019) evaluaron la emisividad (ε) de la parte inferior del techo ventilado y encontraron que la ε depende de la temperatura; que bajar la ε de 0.93 (corresponde al techo tradicional) a 0.32 (techo pintado) disminuye la temperatura diaria de la cubierta del techo aproximadamente de 3-8 °C y la entrada de calor al edificio aproximadamente 2.4 kWh/m². Leccese et al. (2019) encontraron que en techos planos se requiere de ventilación forzada para inducir el movimiento de aire y así evitar la condensación y la aparición de moho debido a la humedad. Lima (2019) comparó un techo ventilado contra uno tradicional y encontró que el techo ventilado reduce la temperatura interior hasta 7.2 °C y el flujo de calor hasta 133.5 W/m². Wong y Li, (2007) colocaron un techo ventilado en un edificio de 14 pisos y encontraron una diferencia de temperatura entre la superficie externa y la interna de 25 °C con el techo ventilado y la demanda de energía se redujo 11.5% respecto al techo común.

Además de los techos planos existe otra variación que son los **techos ventilados inclinados**, los cuales pueden tener el canal de aire del mismo espesor a la entrada y salida, o pueden tener la entrada de aire de un espesor y la salida de un espesor mayor. La inclinación ayuda a que el aire salga del canal por medio de las fuerzas de flotación y evita que el aire caliente se estanque. Los materiales del techo secundario pueden ser tejas de barro, láminas de acero (lisas y corrugadas), ferrocemento, yeso etc. El ángulo del techo secundario se ha variado desde los 0 a los 80 grados y los espesores del canal de aire van desde los 2.5 a los 30 cm. Uno de los principales componentes de los techos ventilados es el canal de aire, por ello múltiples investigadores se han enfocado en su estudio como Tong y Li, (2014) quienes variaron el espesor del canal de aire y la inclinación, encontrándose un espaciamiento óptimo de 8 cm y un flujo de calor al interior que redujo de 39 a 13 W/m². Biwole et al. (2008) descubrieron que conforme aumenta el grosor del canal de aire el flujo de calor disminuye; estos resultados indican que el flujo de calor convectivo del canal se evacúa por completo fuera del canal cuando su grosor alcanza de

6-10 cm y el canal tiene un ángulo mayor 30°. Patania et al. (2011) variaron el tamaño de la cavidad de aire, el ángulo de inclinación y la intensidad de la radiación solar y encontraron un mayor ahorro de energía con un ángulo de 35-38° y un espesor óptimo de 12-13 cm. Liberati et al. (2009) analizaron el techo ventilado de un establo para ganado y encontraron que un canal de aire de 3.5 cm puede reducir la temperatura interna a 23.7 °C y un canal de 7 cm la reduce a 24 °C. Hirunlabh et al. (2001) estudiaron como maximizar la tasa de ventilación natural en 4 configuraciones de techo y encontraron que cuanto mayor es el canal de aire, mayor es la tasa de ventilación inducida, la cual es función de la pendiente y la intensidad de la radiación. Lee et al. (2009) evaluaron el flujo de aire del canal de un prototipo y concluyeron que un techo sin ventilación puede alcanzar hasta los 65 °C, una vez implementada la ventilación la temperatura se redujo a 27.5 °C. Susanti et al. (2011) examinaron la ventilación natural de una cavidad de aire entre dos placas corrugadas, y resultó una diferencia máxima de 19.8 °C entre la superficie exterior del techo ventilado y el techo común. Algunos investigadores agregan materiales extras al techo ventilado para aumentar los beneficios térmicos y ahorro de energía en el edificio como Chang et al. (2008) quienes agregaron una barrera radiante en diferente posición del techo, y encontraron que siempre que el ángulo de inclinación aumente el flujo de calor disminuye y recomiendan un espesor de 10 cm. Lai et al. (2008) colocaron una barrera radiante sobre el techo primario, esto permitió que el flujo de calor hacia el interior se redujera de 4 a 20%, pues la barrera radiante refleja la energía a la placa secundaria y al canal de aire. Yew et al. (2013) agregaron tubos de aluminio y un recubrimiento reflectivo al techo, esta configuración permitió que la temperatura se redujera de 64 a 13 °C cuando se agregó la capa reflectiva. Banionis et al. (2012) encontraron que la mayor disminución del flujo de calor se presenta al incorporar una cubierta reflectiva y el peor escenario con una cubierta de aserrín, ambos redujeron 23.2% y 1.7%, respectivamente. Zingre et al. (2017) compararon un techo ventilado contra uno plano aislado, los autores concluyen que el techo ventilado reduce las ganancias de calor

hasta un 34% y se recomienda el uso de techos ventilados en climas dominados por la refrigeración y los aislados en los dominados por la calefacción. Omar et al. (2017) compararon un techo ventilado clásico y uno con aislamiento, resultó que el techo ventilado clásico redujo 50% el flujo de calor al interior y uno ventilado con aislamiento redujo 85% respecto a un techo tradicional. Se han investigado diferentes materiales para el techo secundario como el trabajo de Ciampi et al. (2005) quienes usaron placas de cobre y tejas terracota en dos techos ventilados que compararon, los resultados mostraron que el techo más conveniente es el de tejas terracota alcanzando un ahorro energético superior al 30%. Hernández y Morrillón (2013) analizaron un techo ventilado con una placa de vidrio como techo secundario y encontraron que a medida que aumenta el flujo de calor, la placa de aluminio y la placa de vidrio aumentan su temperatura dando un calentamiento similar al efecto invernadero. Finalmente, Shen et al. (2017) compararon un techo ventilado contra uno simple, ambos de teja; y encontraron que un techo ventilado de teja reduce el flujo de calor 85% y 5 °C la temperatura interna, además el canal de aire funciona como un aislante que bloquea el aumento de calor durante el día, lo que es desfavorable en invierno, pero beneficioso en verano.

Finalmente, están los techos **ventilados a dos aguas**, en ellos se encontraron inclinaciones desde los 20 a los 60 grados y espesores del ducto ventilado desde los 3 cm hasta espacios completos como el ático mismo. Algunos trabajos de este tipo de configuración son el de D’Orazio et al. (2008) quienes variaron el ducto de ventilación y el grosor del techo y hallaron que las variaciones máximas de temperatura y flujo de calor fueron 2-3 °C y de 1.5-2 W/m², respectivamente. Li et al. (2016) variaron el espesor del canal de aire, el ángulo de inclinación, el grosor de la salida del canal y la absorción de la capa secundaria, y se concluyó que para mejorar el rendimiento del techo se recomienda un espaciamiento del canal de aire de 10 cm y una inclinación del techo del 33-40%. Bianco et al. (2018) observaron el comportamiento del aire en el interior de la cavidad en tres geometrías

diferentes y encontraron que un canal con doble sección de salida es más eficiente en cuanto a la razón de flujo másico. Hansen y Moller (2017) estudiaron la influencia de la barrera de vapor y el espesor del aislamiento en la humedad del aire de áticos ventilados, y descubrieron que, para que crezca moho se tiene que exceder el 95% de humedad relativa a 10 °C; y a pesar de la diferencia en el espesor del aislamiento la temperatura del ático presenta pequeñas diferencias. Hansen y Moeller (2019) probaron el efecto de una barrera de vapor, el tipo y espesor del aislamiento para evitar la humedad de los áticos ventilados, y descubrieron que mientras la tasa de ventilación del ático sea suficiente y la construcción del techo sea hermética, no hay indicios de que se necesite una barrera de vapor. Gagliano et al. (2012) colocaron una placa aislante sobre y debajo del canal de aire, esta variación permitió conocer que un aislante sobre el canal de aire reduce 46% el flujo de calor y un aislante debajo del canal de aire reduce 57% respecto a los techos no ventilados. Levinson et al. (2007) evaluaron tejas estándar, negras, blancas y reflectantes en un techo ventilado y resultó que la teja blanca tiene mejor rendimiento térmico y se pueden ahorrar hasta 92 kWh/año en aire acondicionado. Gullbrekken et al. (2017) observaron el comportamiento térmico de un techo ventilado en tres estaciones del año y hallaron temperaturas del techo secundario de hasta 60 °C en verano, 17 °C en otoño y en general las velocidades del viento fueron bajas. En la Figura 1.2 se muestra un diagrama de la clasificación de los techos ventilados y sus características más sobresalientes que se encontraron en la revisión bibliográfica que se realizó.

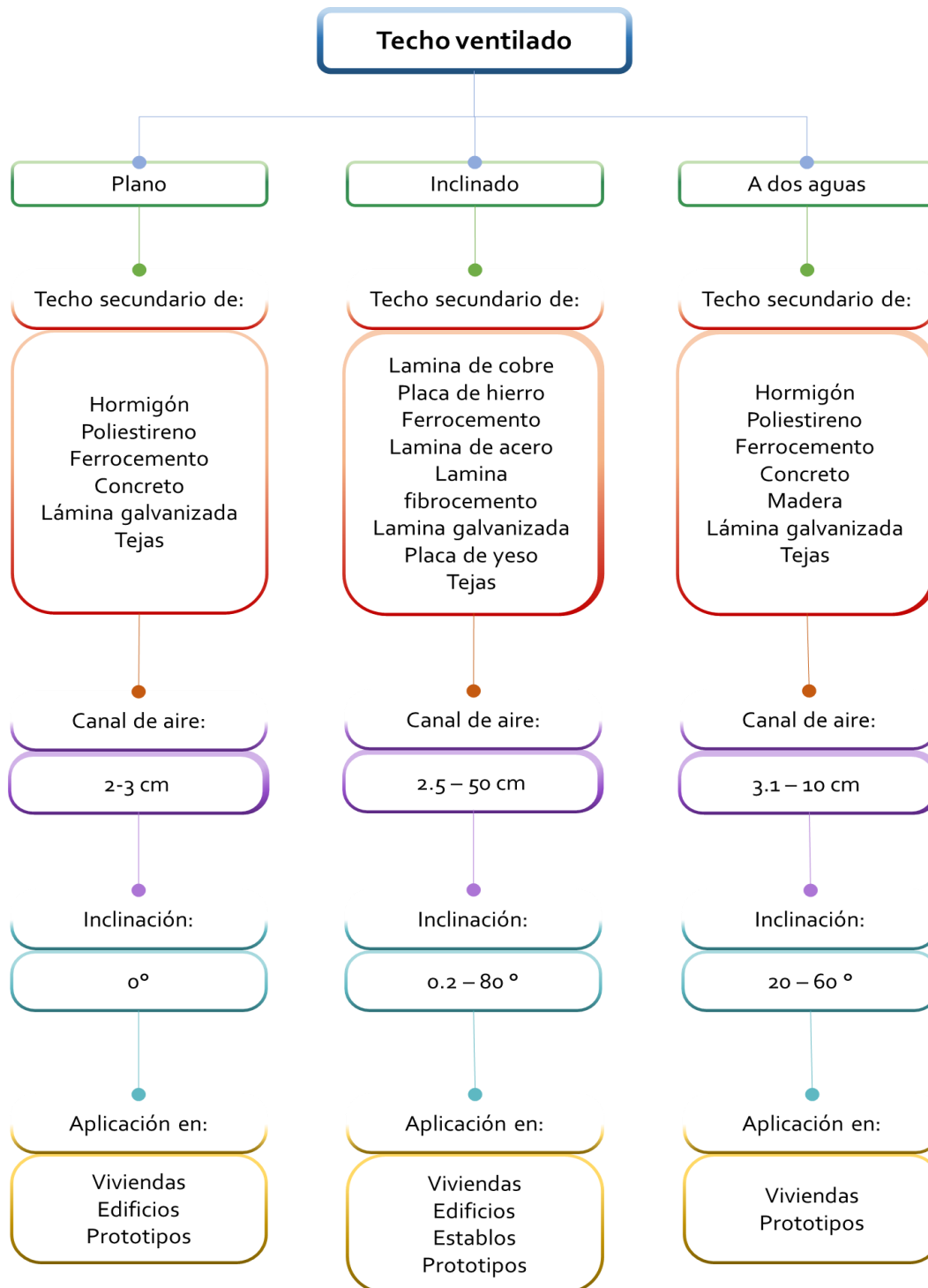


Figura 1.2 Clasificación de los techos ventilados.

Además de los techos ventilados, los **techos verdes** también son una buena alternativa para bloquear la radiación solar directa que llega al techo y así disminuir la temperatura interna de las edificaciones. Al contrario de lo que sucede con otras superficies expuestas a la radiación solar, la vegetación no se sobrecalienta y su temperatura sigue siendo similar a la temperatura del aire (Sánchez-Reséndiz et al. 2018). Del 100% de radiación que incide sobre una hoja, 5-30% se refleja, 5-20% se usa para la fotosíntesis, 10-50% se transforma en calor, 20-40% se usa para evapotranspiración y 5-30% se pasa a través de la hoja (Ottelé et al. 2011). El efecto que ayuda a disminuir la temperatura del techo y del aire circundante a la vegetación es la evapotranspiración, este es un fenómeno que engloba el agua transpirada por las plantas y el agua evaporada de la superficie del suelo y de la vegetación. La evapotranspiración se ve afectada por parámetros climatológicos como la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad del aire, la velocidad del viento, la lluvia y las condiciones del cielo, así como de las características del sustrato y la vegetación misma (Cascone et al. 2019).

Los techos verdes están formados por una serie de capas que ayudan a mantener la edificación seca, libre de humedad y protegida de las raíces. El número de componentes (capas) y diseño varían de acuerdo al clima y a la región, pues se adaptan a las necesidades locales para que su funcionamiento sea el máximo. Sin embargo, todos los diseños tienen un número de capas mínimas para su funcionamiento que son la vegetación, el sustrato, capa de drenaje y capas protectoras (antiraiz e impermeabilizante), y como capas opcionales se encuentran los aislantes, filtros de sustrato, capa de aireación, retenedores de humedad y reservorios de agua. Los techos verdes se clasifican en tres grupos de acuerdo al espesor de sustrato y tipo de plantas. Primero están los *extensivos*, con un espesor de sustrato de 6-20 cm, un peso de 60-150 kg/m², la vegetación adecuada son musgos, sedums, hierbas y césped, el costo de instalación y el mantenimiento es bajo. Después se encuentran los techos *semi-intensivos*, con un sustrato de 12-15 cm, un peso de

120-200 kg/m², la vegetación recomendada son césped, hierbas y arbustos, el costo es medio y el mantenimiento periódico. Finalmente, se encuentran los techos *intensivos*, con sustratos mayores a 15 cm, un peso de 180-500 kg/m², una vegetación con pastizales, plantas perenes, arbustos y pequeños árboles, el costo es alto y el mantenimiento regular. (Fernández-Cañero et al. 2013)

Algunos beneficios que los techos verdes han demostrado es la mejora del rendimiento térmico y en consecuencia la reducción de la demanda energética, reducción de la contaminación del aire (consumen directamente los contaminantes gaseosos a través de sus estomas), reducción de la UHI, mejoramiento de la calidad del agua (algunos contaminantes contenidos en el agua de lluvia son retenidos por el sustrato, por lo que se produce una escorrentía de aguas pluviales de buena calidad), atenuación de aguas pluviales (los techos verdes retienen el agua de lluvia y retrasan el flujo máximo, por lo que reducen el riesgo de inundaciones), reducción de ruido (la vegetación absorbe las ondas sonoras que se difractan sobre el techo), protegen el techo de la edificación del calor extremo, el viento y la radiación ultravioleta, mejoran el aspecto estético de los edificios, protegen la fauna como pájaros e insectos (Vijayaraghavan, 2016). Sumado a todo lo anterior, la reducción de la temperatura a nivel peatonal es otro de los atractivos que últimamente se ha estudiado más a fondo. Esta reducción de temperatura depende de la altura del edificio y de la densidad de la vegetación. Los edificios con techo verde (cobertura del 100%) con una altura inferior a 10 m pueden disminuir la temperatura de las calles hasta por 3 °C (Smith y Roebber 2011). Cuando la altura del edificio es de 20 m, la reducción de la temperatura del aire en los cañones de las calles es de aproximadamente 0.3 °C. Mientras que los edificios de más de 40 m de altura, no tuvieron efecto sobre el ambiente térmico regional. Por lo tanto, los efectos de enfriamiento tanto en el techo como a nivel peatonal tienden a ser más pronunciados en sitios de poca altura (Jin, et al. 2018).

Las *paredes verdes* también aportan enfriamiento a la edificación y a las calles. Estos sistemas al igual que los techos verdes presentan los beneficios ambientales, sociales y económicos de los techos verdes (Medl et al. 2017), con varias diferencias entre sí. La más sobresaliente es la ubicación de la vegetación, en techos es horizontal y en paredes es vertical. Otra diferencia importante es el tipo de vegetación, los techos verdes pueden albergar una gama variada de plantas, desde césped, arbustos e incluso árboles, mientras que las paredes soportan plantas pequeñas y enredaderas. Básicamente las paredes verdes se dividen en dos grandes grupos: las fachadas verdes y las paredes vivas. En las fachadas verdes se usan enredaderas o plantas trepadoras que crecen directamente sobre la pared o sobre una estructura metálica. Las paredes vivas usan una variedad más amplia de plantas que se colocan de forma continua sobre la pared o en pequeñas bolsas flexibles. Las paredes vivas permiten una rápida cobertura de grandes superficies y un crecimiento más uniforme llegando a zonas más elevadas y adaptándose a todo tipo de edificaciones (Manso y Castro-Gomes, 2015). En la Figura 1.3 se presenta la clasificación de la infraestructura verde (techos y muros) y algunas características importantes.

Para la infraestructura verde la vegetación es de suma importancia, pues de ella depende el porcentaje de sombreado y el nivel de evapotranspiración, efectos que recaen directamente sobre el rendimiento térmico de la edificación. Conociendo la importancia de la vegetación algunos autores se han centrado en el estudio de las plantas y su selección para usarse en techos y paredes verdes. De este modo, se asegura que tanto el techo como la pared funcionen de la mejor manera. Coma et al. (2014) colocaron cuatro enredaderas (*Hedera hélix*, *Lonicera japónica*, *parthenocissus tricuspidata* y *Clematis sp*) sobre una malla y analizaron la resistencia, la altura que pueden alcanzar, la disponibilidad en los viveros, la adaptación al suelo y a los módulos. Observaron que las especies crecieron 1 m de verano a invierno y en otoño perdieron las hojas. Coma et al. (2017) compararon el rendimiento térmico de una fachada verde con la especie *Parthenocissus tricuspidata*, un

muro vivo con la especie *Helichrysum thianschanicum* y un muro tradicional; y encontraron que la vegetación muestra un alto potencial de ahorro de energía durante el verano, de 58.9% para el muro vivo y 33.8% para la fachada verde en comparación con el sistema de referencia. Vox et al. (2018) compararon el desempeño térmico de las especies *Pandorea jasminoides abigarradas* y *Rhynchospermum jasminoides* aplicadas en paredes verdes, y descubrieron que la vegetación reduce la temperatura de la pared hasta por 7 °C a lo largo del año. Dahanayake et al. (2017) también analizaron la vegetación, pero por medio del software EnergyPlus. Ellos variaron el índice de cobertura de la vegetación y encontraron que un aumento del índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés) de 1 a 5 reduce la temperatura exterior de 52 a 40 °C y las cargas térmicas de 10 kWh/m² a 3.8 kWh/m².

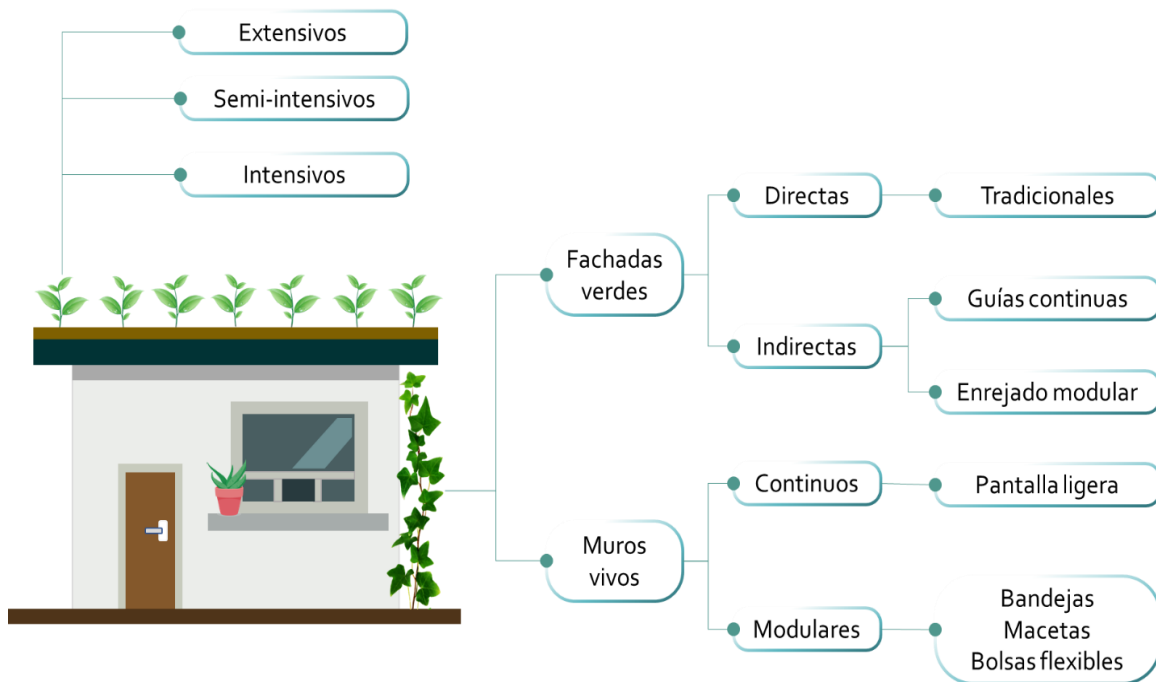


Figura 1.3 Clasificación de la infraestructura verde.

Como se observó en los estudios revisados, los techos ventilados han demostrado que son buenos aislantes térmicos, disminuyen la temperatura y la demanda de enfriamiento. Los techos pueden ser horizontales, inclinados con una pendiente o a dos aguas; los ángulos de inclinación reportados van desde 2° a 80°. Otra de las características importantes de los techos ventilados es su amplia gama de materiales con los que se puede construir el techo secundario. Estos materiales pueden ser lámina galvanizada, de aluminio, de fibrocemento, placas de concreto, tejas, madera, etc. Las láminas pueden ser planas o corrugadas y de varios colores. Los investigadores se centraron en la evaluación del rendimiento térmico de los techos ventilados al variar el espesor del canal de aire, la inclinación del techo, el grosor de aislamiento, el uso de una barrera radiante y una barrera de vapor. Por otra parte, se encontró que la mayoría de los estudios son realizados experimentalmente y el comportamiento del techo ventilado depende de las condiciones climáticas, en el día el canal de aire impide que los flujos de calor lleguen al interior de la edificación y en las noches dificulta la pérdida de energía almacenada en el techo. Para ver más información de los estudios revisados ver el Apéndice A y B donde se detallan el objetivo, la metodología y los resultados de cada investigación.

De acuerdo a la bibliografía revisada, las enredaderas han sido seleccionadas para evaluar su comportamiento térmico sobre los muros y hasta el momento no se han encontrado trabajos donde se utilicen las enredaderas para ser utilizadas en techos. Uno de los objetivos de esta tesis fue evaluar el comportamiento térmico de un techo ventilado con vegetación, el cual se forma con la combinación de tres técnicas pasivas: se usaron enredaderas como las usadas en fachas verdes y se colocaron de manera horizontal como se coloca la vegetación en los techos verdes, de esta manera se formó el techo ventilado verde; el cual se comparó con un techo ventilado de lámina galvanizada y teja de barro; que, a su vez se compararon con un techo tradicional. Por lo anterior, se presenta en la siguiente sección el objetivo general y alcance del trabajo.

1.2 Objetivo

Estudiar el comportamiento térmico del último nivel de un edificio no residencial con diferentes techos ventilados y compararlos con un techo tradicional.

1.2.1 Objetivos específicos

1. Seleccionar el tipo de vegetación que se va a utilizar en el techo ventilado-verde.
2. Construir celdas de prueba para los diferentes tipos de techo ventilado (lámina galvanizada, teja tradicional y vegetación).
3. Instrumentar las celdas de prueba para medir la temperatura en los diferentes componentes del techo y en el interior de la cavidad.
4. Validar la simulación con datos experimentales.
5. Simular el edificio no residencial en evolución libre y con un sistema de enfriamiento mecánico con los diferentes tipos de techo ventilado.
6. Realizar un estudio de costo beneficio.
7. Análisis de resultados finales.

1.3 Alcance

Simular el comportamiento térmico del último nivel de un edificio no residencial con varios tipos de techo ventilado (lámina galvanizada, teja tradicional y vegetación) y techo de concreto tradicional, bajo las condiciones climáticas de un año de la Cd. de Cuernavaca Morelos, lugar donde se encuentra ubicado el edificio de estudio. Se pusieron a prueba cuatro especies de vegetación por cinco meses para seleccionar la mejor y ser usada en el techo ventilado-verde. Se realizaron mediciones en celdas de prueba con los diferentes tipos de techos por cinco meses, para realizar la validación de los tipos de techo y del uso adecuado de los softwares. En la simulación del edificio se consideró evolución libre y

con un sistema mecánico de enfriamiento, además de puertas y ventanas cerradas, no hay cargas internas por equipo eléctrico o iluminación y nula actividad de personas. Para la simulación se utilizaron los softwares DesignBuilder y EnergyPlus. Finalmente, se hizo un estudio comparativo para determinar el tipo de cubierta ventilada que proporciona mayor ahorro de energía, así mismo, un estudio costo-beneficio que proyectó la rentabilidad de la implementación del techo ventilado.

1.4 Descripción de los capítulos

El trabajo está compuesto por seis capítulos. En el **Capítulo 1: Introducción**, se presentó la crisis energética a nivel mundial y nacional que motiva el desarrollo de esta tesis, se describe la arquitectura bioclimática y el estado del arte sobre los techos ventilados, techos verdes y paredes verdes y los objetivos que se buscaron con la elaboración del proyecto. En el **Capítulo 2: Modelos físicos y matemáticos**, se muestran los modelos físicos del techo tradicional, techo ventilado, techo verde y techo ventilado-verde, así como sus características y ventajas. También se presentan los softwares de simulación que se utilizaron: EnergyPlus y DesignBuilder, así como la matemática que describe el comportamiento térmico de la edificación con el ambiente. Posteriormente, el **Capítulo 3: Desarrollo experimental**, se compone de tres etapas: en la etapa I se describe la selección de la vegetación, en la etapa II la construcción de los módulos de prueba, así como la instrumentación y los periodos de medición en las dos etapas (I y II). Y en la etapa III se valida/calibra el modelo geométrico de los módulos de prueba en el software. En el **Capítulo 4: Caso de estudio**, se describe la edificación no residencial usada en la simulación, con las zonas térmicas, características constructivas y parámetros de simulación. Posteriormente, en el **Capítulo 5: Resultados de la simulación**, se muestran los resultados del comportamiento térmico de las cuatro configuraciones de techos (tradicional, ventilado de teja, lámina y verde) en evolución libre y con un sistema de

climatización, para llegar a un análisis de costo beneficio de la implementación de los techos ventilados. Finalmente, en el **Capítulo 6: Conclusiones generales**, se muestran las conclusiones obtenidas a partir del análisis de resultados y se presentan las recomendaciones para trabajos posteriores.

Capítulo 2

Modelos físicos y matemáticos

El modelo físico es una representación geométrica del sistema real que se pretende estudiar, el cual permite abordar el problema y sus posibles soluciones de una manera más simplificada. En este capítulo se presenta el modelo físico de un techo común, un techo ventilado tradicional, un techo verde y un techo ventilado-verde (es la combinación de un techo ventilado más un techo verde) y el intercambio energético causado por la diferencia de temperaturas entre los componentes del techo y el medio ambiente. Además, se describen los modelos matemáticos que representan el fenómeno bajo estudio, donde se consideran los flujos de calor convectivos, radiativos y conductivos a través de los muros de la edificación.

2.1 Modelo físico de un techo tradicional

En este caso particular se estudió un edificio de cuatro niveles con techo tradicional, que tiene en sus fachadas puertas y ventanas. Sin embargo, la componente del edificio donde se puso principal interés es el techo, por ello en la representación visual se presenta solo esa parte; pero sin olvidar que en las simulaciones se toma todo el edificio como un conjunto.

En la Figura 2.1 se muestra de manera simplificada el modelo físico del techo y parte de la habitación. El techo está formado con una losa tradicional de concreto que está expuesta directamente a los cambios ambientales, lo que provoca que reciba radiación solar directa y difusa. Debido a las propiedades del techo y de ser una superficie opaca, parte de la energía incidente es reflejada y otra parte es absorbida. La fracción de energía absorbida por la losa induce que su temperatura aumente gradualmente, lo que provoca que haya una diferencia de temperaturas entre la losa y el aire adyacente de la superficie exterior e interior; esta diferencia de temperaturas genera que haya flujos de calor convectivos y radiativos, tanto externos como internos. Este mismo fenómeno ocurre también en los muros, lo que provoca que la temperatura interior de la habitación aumente o disminuya. Este sistema de losa tradicional se usó como referencia para comparar el rendimiento de los diferentes techos.

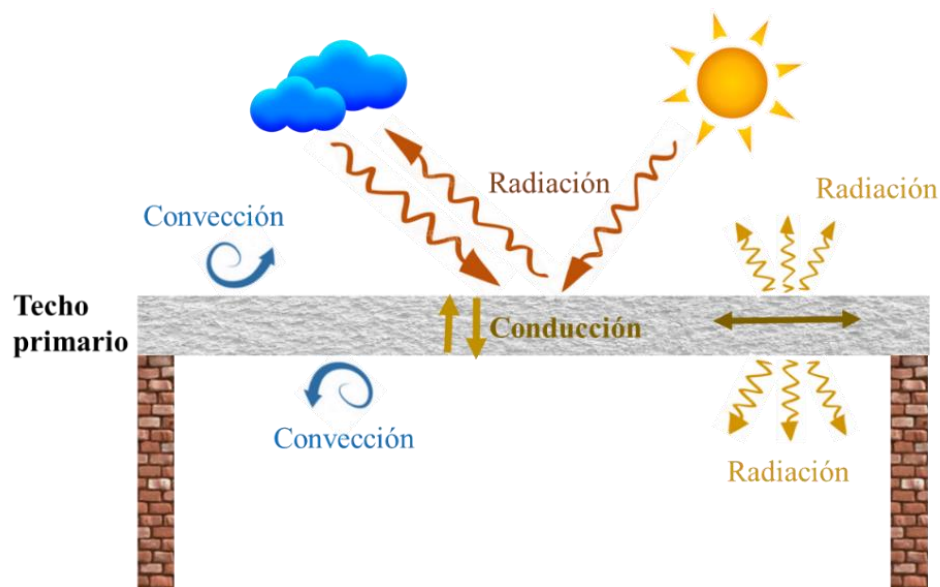


Figura 2.1 Modelo físico de un techo tradicional.

2.2 Modelo físico de un techo ventilado

En la Figura 2.2 se presenta el modelo físico de un techo ventilado, el cual está formado por dos superficies planas separadas por un canal de aire. El techo primario es el techo base de la edificación y el techo secundario se agrega en la parte exterior del techo primario. Los techos ventilados funcionan como un escudo protector de la radiación solar (directa y difusa), que es la principal fuente de ganancia de energía para los componentes expuestos al ambiente exterior. Del total de radiación que llega al techo secundario, una parte es reflejada al ambiente, como el techo secundario es opaco el resto de la radiación se absorbe y calienta la placa. Una vez caliente la placa, esta incrementa su temperatura y disipa energía por radiación y convección en ambos ambientes: al exterior y al canal de aire. El techo de la edificación también se calienta y aumenta su temperatura al recibir la radiación del techo secundario, y a su vez, su energía se disipa al canal de aire y al ambiente interior de la habitación. El aire que está dentro del canal se calienta después de absorber el calor por convección y radiación del techo secundario y techo primario, y se forma un flujo ascendente dentro de la cavidad debido a la fuerza de flotación, que contribuye a expulsar el calor acumulado en el techo, y así reduce la transmisión de calor al interior del edificio.

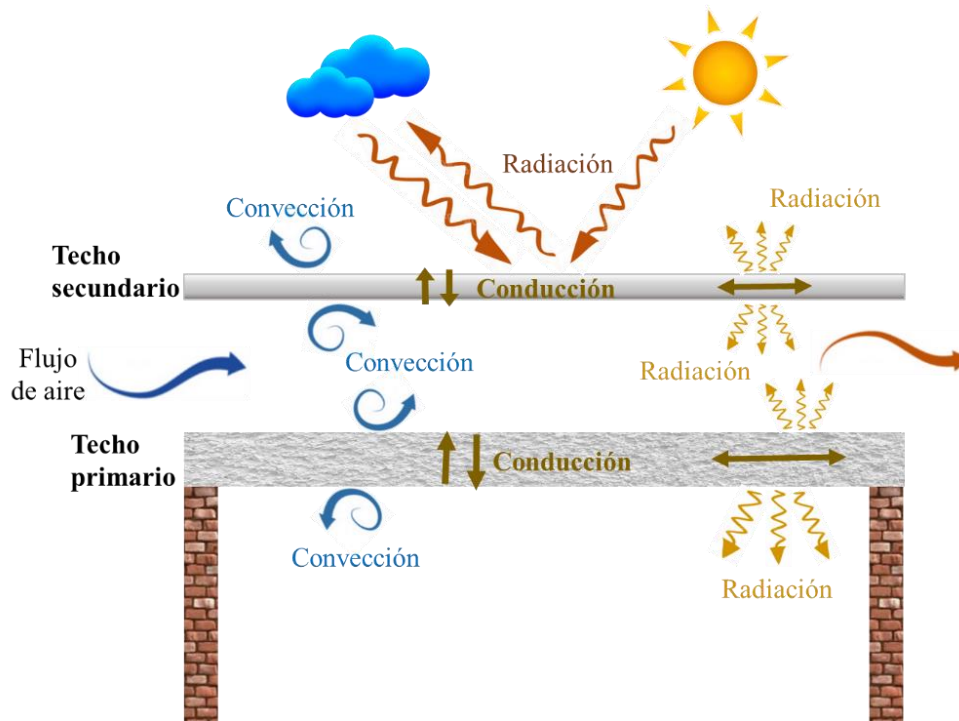


Figura 2.2 Modelo físico de un techo ventilado.

2.3 Modelo físico de un techo verde

En la Figura 2.3 se observan el modelo físico del techo verde y los mecanismos de transferencia de calor que ocurren en el techo. De la radiación solar incidente, el follaje refleja alrededor del 20-30%, absorbe alrededor del 60% para el proceso de la fotosíntesis, y solo el 20% se transmite al medio de cultivo que se encuentra debajo de las hojas (Berardi et al., 2014). La parte de la energía que llega al sustrato aumenta su temperatura, y parte de esta energía se transmite por conducción a la capa anti raíz. Posteriormente, parte de la energía contenida en la capa anti raíz es transferida por conducción al impermeabilizante, que, a su vez, sede parte de la energía a la losa de concreto. La losa está en contacto directo con el ambiente interior, lo que provoca que aumente la temperatura del aire interno por medio del intercambio convectivo y radiativo.

Uno de las características más sobresalientes e importantes de los techos verdes es la evapotranspiración. Este proceso humedece el aire ambiente externo, reduce la temperatura superficial del techo y mitiga la isla de calor urbano. La evapotranspiración es la combinación del agua transpirada por las plantas durante su crecimiento más la humedad evaporada de la superficie del suelo. La transpiración es el proceso por el cual la planta transporta agua desde las raíces hasta pequeños poros localizados en las hojas, donde se transforma en vapor y se libera a la atmósfera. Por otro lado, la evaporación es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua y se retira de la superficie del suelo. Estos procesos están determinados principalmente por la radiación solar que llega al techo ya que aporta la energía necesaria para la remoción de humedad, además también hay que tener en cuenta el gradiente de presión del vapor, la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad atmosférica.

Los techos típicos de concreto, betún, alquitrán y grava tienen valores de reflectancia de 0.1-0.2, mientras que la vegetación tiene valores de 0.7 a 0.85; lo que ayuda a reducir el flujo de calor en un 70-90% en verano y alrededor de un 10-30% en invierno, dependiendo de la zona climática (Berardi et al., 2014). En climas fríos, se recomienda que la vegetación tenga follaje caducifolio, esto quiere decir, que sus hojas son estacionales; en la temporada otoño-invierno la planta pierde las hojas y esto permite que la radiación llegue hasta el interior de los edificios reduciendo el uso de calefacción (Sailor, 2008).

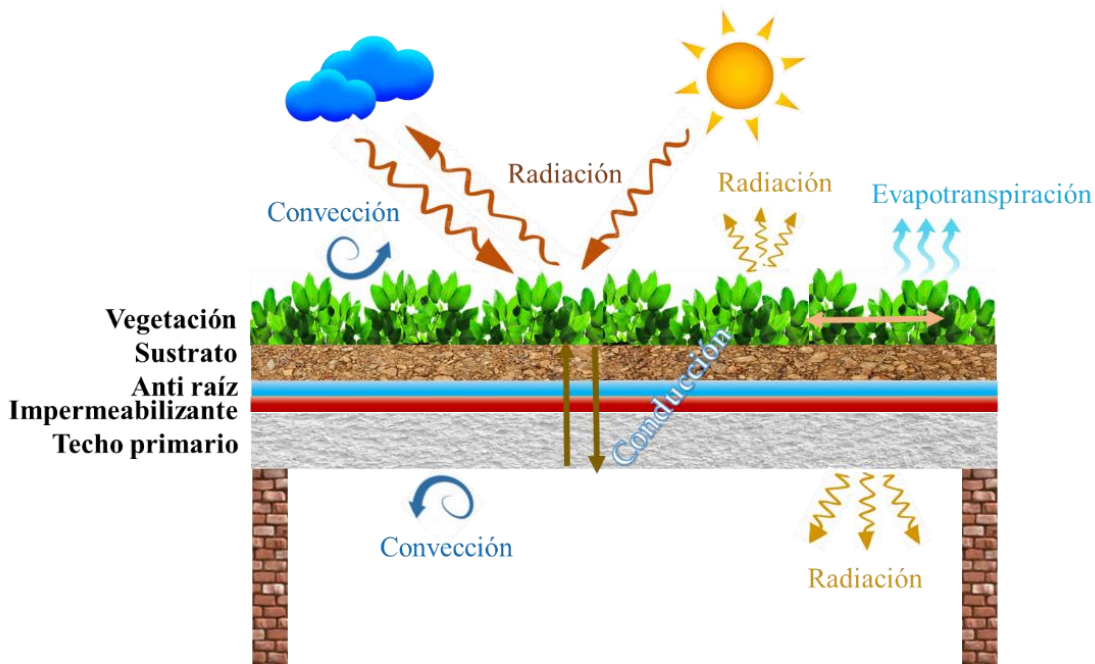


Figura 2.3 Modelo físico de un techo verde.

2.4 Modelo físico de un techo ventilado verde

Esta configuración de techo es un diseño novedoso que combina un techo ventilado común con un techo verde. De esta manera se buscan los beneficios de ambos sistemas, por un lado, bloquear la radiación solar que llega al techo y por el otro, disminuir la temperatura tanto del techo como del aire cercano a la vegetación, además de disminuir el peso sobre la edificación. El modelo físico se observa en la Figura 2.4, los mecanismos de transferencia de calor en la vegetación son los mismos que los presentados en el techo verde. Del total de radiación solar incidente, un porcentaje se absorbe, otro se refleja y otro se transmite, en este caso, directamente al techo de la edificación; donde de nuevo una parte se refleja y otra se absorbe. La energía que recibe la losa aumenta su temperatura y parte del calor es liberado al interior de la edificación y al canal de aire. Por lo tanto, el aire del canal recibe energía del techo primario y secundario y se produce un gradiente

de temperatura entre las moléculas que ayuda a que el aire caliente ascienda y salga del canal.

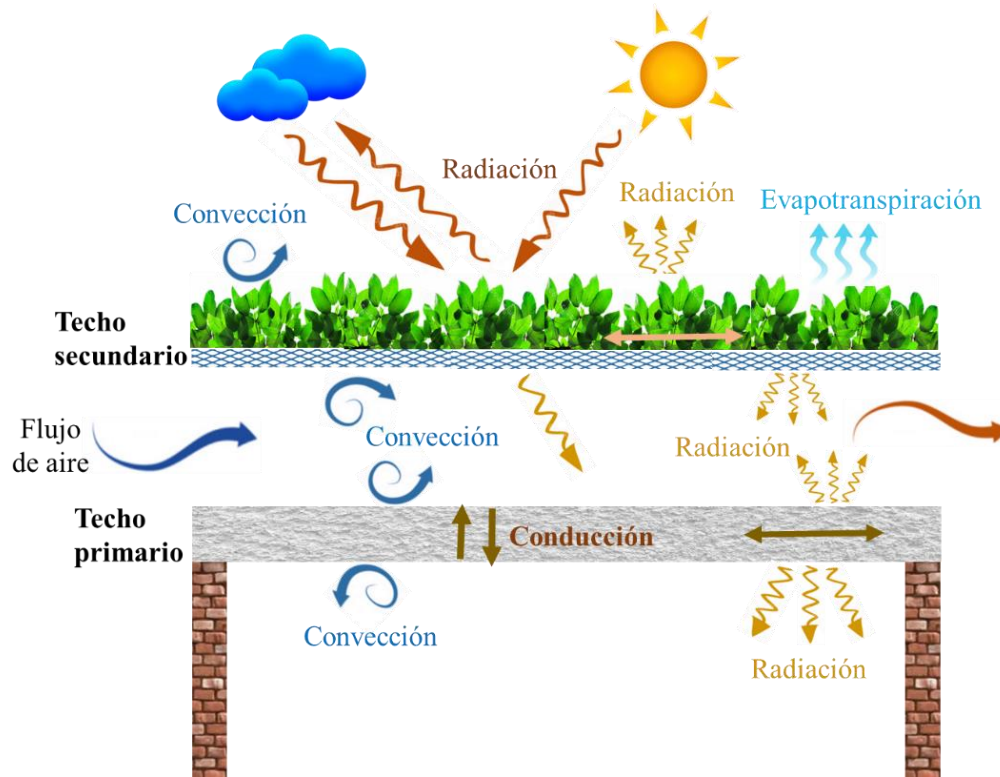


Figura 2.4 Modelo físico de un techo ventilado verde.

Además de los beneficios térmicos y energéticos que el techo ventilado verde puede proporcionar, se encuentran los beneficios ambientales como la producción de oxígeno (Tabla 2.1). La vegetación convierte el dióxido de carbono, agua y radiación solar en oxígeno y glucosa por medio de la fotosíntesis. Por ejemplo, 25 m² de superficie de hoja pueden producir 27 g de oxígeno por hora durante el día, lo que equivale a la cantidad de oxígeno que necesita un ser humano durante el mismo período de tiempo. Sin embargo, considerando los efectos de la naturaleza, la noche (sin luz solar) y el invierno (sin hojas

verdes si se utilizan plantas de hoja caduca), se requerirían 150 m² de superficie de hoja para equilibrar la ingesta humana de oxígeno durante un año (Peck y Callaghan, 1999). Mejoran la calidad del aire urbano al reducir y filtrar la acumulación de polvo y metales pesados en el aire. También la vegetación contribuye a preservar la biodiversidad urbana, actuando como hábitat para la colonización de especies como plantas espontáneas, escarabajos, abejas, hormigas, arañas y pájaros (Vox, et al. 2018). La presencia de vegetación tiene un impacto psicológico positivo en los habitantes urbanos, además de mejorar la estética visual de las ciudades y elevar los precios de los bienes inmuebles (Besir y Cuce, 2018). En general, los techos ventilados protegen los acabados exteriores de la radiación ultravioleta, la lluvia, las fluctuaciones extremas de temperatura y la presencia de humedad.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de las tecnologías verdes.

	Ventajas	Desventajas
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Mitigación del efecto de UHI • Disminución del flujo de calor entrante • Mejora de la calidad del aire • Retención de las aguas pluviales (reducción de escorrentías) • Aprovechamiento del agua pluvial • Aislamiento acústico • Producción de oxígeno y secuestro de CO₂ • Recuperación del suelo utilizado por la urbanización • Creación de hábitats para insectos y aves 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento del consumo de agua para riego • Aumento de insectos molestos para el ser humano (mosquitos, hormigas, gusanos) • Utilización de plásticos
Económicas	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de la demanda energética por sistemas HVAC • Aumento de la vida útil del techo • Aumento del valor de la propiedad • Reducción del pago de impuestos (algunos países) 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo inicial de la construcción • Costo de operación y mantenimiento
Sociales	<ul style="list-style-type: none"> • Creación de espacios de esparcimiento • Creación de huertos urbanos • Mejora de la salud física y mental • 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de un reglamento para la instalación (algunos países) • Falta de apoyo económico para la creación de espacios verdes
Estéticas	<ul style="list-style-type: none"> • Mejoramiento de la imagen urbana • Rehabilitación de espacios en desuso 	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de la humedad de la envolvente (no siempre ocurre)

2.5 Características de los softwares usados

2.5.1 EnergyPlus

EnergyPlus fue creado con base en los programas DOE-2 y BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) desarrollados a principios de 1980. Al igual que sus predecesores, EnergyPlus realiza análisis de energía y simulaciones de carga térmica, partiendo desde el modelo físico de un edificio, para calcular las cargas de calefacción y refrigeración necesarias para mantener la temperatura de confort. También realiza análisis de iluminación, de persianas controlables y cristales electrocrómicos, de ventilación, consumo de electricidad y gas, entre otros, gracias a los balances de calor en las superficies que consideran los efectos de conducción, convección, radiación, transferencia de masa y condiciones de frontera. La técnica de solución es un modelo de balance de calor global en una dimensión, lo que indica que las superficies y el aire de la zona se modelan con una temperatura uniforme, es decir, con un solo nodo. Los pasos de tiempo son definidos por el usuario, estos pueden ser horarios o subhorarios.

Modelación matemática para la simulación térmica de edificaciones

El comportamiento térmico de la edificación está directamente influenciado por las condiciones meteorológicas de su alrededor y son las superficies exteriores las que intercambian energía con el medio ambiente. En la Figura 2.5 se muestran los intercambios energéticos internos y externos que ocurren en la edificación. Para más detalle sobre los modelos matemáticos consultar el manual de usuario de EnergyPlus.

Balance de calor en la superficie exterior

En la Figura 2.5 se muestra de forma gráfica el intercambio energético en la superficie exterior de la edificación, que toma en cuenta cuatro flujos de calor provenientes del

medio ambiente: el flujo de calor por radiación de onda corta, de onda larga, por convección y conducción a través del muro, y se determina con el modelo de la Ecuación siguiente:

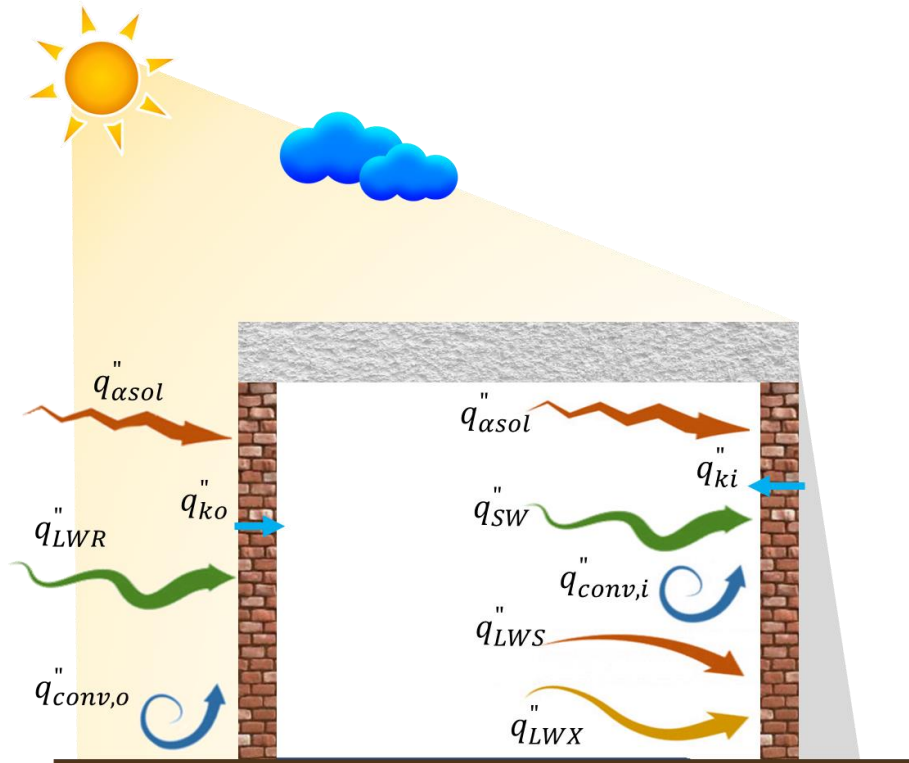


Figura 2.5 Intercambio energético en la edificación.

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv,o} - q''_{ko} = 0 \tag{2.1}$$

donde q''_{asol} representa el intercambio de calor por radiación solar directa y difusa, también llamada de onda corta. Esta ganancia de energía sobre la superficie depende principalmente de la absorptividad (α), del área total (S) y del área soleada del muro (S_s);

de los factores de vista entre la superficie y el cielo (F_{sc}) y entre la superficie y el suelo (F_{sg}); del ángulo de incidencia de los rayos del sol (A) y de la intensidad de la radiación directa (I_b), difusa (I_s) y reflejada (I_g). Todos estos parámetros se pueden ver agrupados en la siguiente ecuación:

$$q''_{asol} = \alpha \left(I_b \cos A \frac{S_s}{S} + I_s F_{sc} + I_g F_{sg} \right) \quad (2.2)$$

q''_{LWR} es el intercambio de radiación con el ambiente, también llamada radiación de onda larga. El flujo de calor radiativo total es la suma de los componentes debido al intercambio de radiación con el suelo (q''_{gnd}), el cielo (q''_{sky}) y el aire (q''_{air}), y se calcula como sigue:

$$q''_{LWR} = q''_{gnd} + q''_{sky} + q''_{air} \quad (2.3)$$

aplicando la ley de Stefan-Boltzmann en cada termino se obtiene un modelo que relaciona la temperatura de la superficie externa (T_{surf}), del suelo (T_{gnd}), del cielo (T_{sky}) y del aire (T_{air}); y los factores de vista de la superficie al suelo (F_{gnd}), al cielo (F_{sky}) y al aire (F_{air}). Cada termino se expresó de la siguiente manera:

$$q''_{LWR} = \varepsilon \sigma F_{gnd} (T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{sky} (T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon \sigma F_{air} (T_{air}^4 - T_{surf}^4) \quad (2.4)$$

q''_{conv} representa el intercambio convectivo con el aire exterior, el cual depende del área de la superficie (A), el coeficiente convectivo exterior (h_{ext}) y las temperaturas de la superficie (T_{surf}) y del aire (T_{air}), el modelo que representa el intercambio de energía es el siguiente:

$$q''_{conv,o} = h_{ext} A (T_{surf} - T_{air}) \quad (2.5)$$

q''_{ko} indica el flujo de calor por conducción en la pared, que depende principalmente de las condiciones termofísicas del muro.

EnergyPlus determina los flujos de calor, la temperatura y las cargas térmicas con el método de *Funciones de Transferencia de Conducción* (CTF), que permite determinar la conducción de calor en 1D y estado transitorio. Dado que todos los flujos de energía en cada zona deben estar balanceados, se debe resolver simultáneamente un conjunto de ecuaciones de balance de energía para el aire de la zona y las superficies interiores y exteriores de cada pared, techo y piso. El método se puede ilustrar considerando una zona que consta de seis superficies: cuatro paredes, un techo y un piso. La zona recibe energía de la radiación solar que ingresa a través de las ventanas, el calor conducido a través de las paredes exteriores y el techo, y las ganancias de calor internas debido a la iluminación, el equipo y los ocupantes. El método determina la respuesta que tiene un sistema a un conjunto de excitaciones, sin considerar la interacción de los componentes entre sí, solo la respuesta del sistema en su conjunto. El enfoque general relaciona el flujo de calor de un muro con una serie infinita de temperatura en ambas superficies de frontera, la serie infinita es aproximada por una serie finita. Por lo tanto, las Funciones de Transferencia son series en el tiempo, con las cuales se determina la temperatura y flujo de calor de superficies internas y externas de una pared a partir de valores actuales y anteriores de esas variables. La ecuación que relaciona el flujo en una superficie con una serie infinita de historias de temperatura en ambos lados, se muestra en seguida:

$$q''_{ko}(t) = \sum_{j=0}^{\infty} X_j T_{o,t-j\delta} - \sum_{j=0}^{\infty} Y_j T_{i,t-j\delta} \quad (2.6)$$

donde q'' es el flujo de calor conductivo, i es el interior del elemento, o el exterior del elemento, t es el paso de tiempo actual, X y Y son los coeficientes de la función de

transferencia de conducción, generalmente son denominados factores de respuesta y de las propiedades físicas de los materiales de la envolvente. La forma básica de una solución de función de transferencia de conducción (CTF) para el flujo de calor exterior (q''_{ko}) e interior (q''_{ki}) se muestra mediante la siguiente ecuación:

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (2.7)$$

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (2.8)$$

donde:

- Y_j es el coeficiente de CTF a través del muro, es decir, los flujos de energía actuales y anteriores a través del muro debido a las condiciones exteriores, $j=1, 2, \dots, nz$.
- X_j es el coeficiente de CTF al exterior, $j=1, 2, \dots, nz$.
- Z_j es el coeficiente CTF al interior, $j=1, 2, \dots, nz$.
- Φ_j es el coeficiente de CTF del flujo, se refiere al flujo de calor actual y anterior de la zona, $j=1, 2, \dots, nq$.
- T_i es la temperatura de la superficie interior.
- T_o es la temperatura de la superficie exterior.

Estas ecuaciones establecen que el flujo de calor en cualquiera de las superficies está relacionado linealmente con la temperatura actual y con algunas de las temperaturas anteriores, tanto en la superficie interior como exterior, así como con valores del flujo de calor anteriores. Los coeficientes son constantes y solo deben determinarse una vez para

cada tipo de edificación. Además, el único almacenamiento de datos requerido son los coeficientes y un número limitado de términos de temperatura y flujo

Balance de calor en la superficie interior

En la Figura 2.5 se aprecia el intercambio energético en la superficie interior del recinto, donde se considera la conducción a través del muro, la convección al aire y los flujos radiativos de onda corta y onda larga. El balance de calor que lo representa es el siguiente:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv,i} = 0 \quad (2.9)$$

donde:

q''_{LWX} indica el flujo de calor del intercambio radiante de onda larga entre las superficies internas de la habitación.

q''_{SW} es la radiación de onda corta proveniente de las luces artificiales.

q''_{LWS} indica el flujo de radiación de onda larga de equipo electrónico y el personal de la habitación.

q''_{ki} es el flujo de calor por conducción a través de la pared.

q''_{sol} indica la radiación solar transmitida por las ventanas que se absorbe en la superficie.

$q''_{conv,i}$ es el flujo de calor convectivo en la habitación.

En la formulación del balance de calor EnergyPlus considera el aire de la habitación como transparente, lo que indica que no participa en el intercambio radiativo de onda larga entre las superficies internas. Esto se puede hacer debido a las bajas concentraciones de

vapor de agua y las cortas longitudes medias entre las superficies. También se considera que las superficies son opacas y la radiación es difusa.

Coeficientes convectivos interiores

Los coeficientes de convección interior (h_c) se calculan con correlaciones para la convección natural, forzada y mixta. Existen en las librerías de EnergyPlus numerosas ecuaciones que determinan el h_c para diferentes situaciones. Existen cuatro metodologías que el usuario puede seleccionar para el cálculo del coeficiente convectivo interior:

1. *Algoritmo de convección adaptativo*, el algoritmo se utiliza para seleccionar de entre todas las ecuaciones del coeficiente convectivo disponibles, la más apropiada para una superficie en un momento determinado durante la simulación. Este método se basa en la clasificación de superficies por régimen de flujo y orientación; y tiene un total de 45 categorías diferentes. Algunas de las características que toma EnergyPlus para asignar la ecuación de h_c es la orientación de la pared (horizontal o vertical), del estado (estable o inestable), si hay un suelo radiante, un techo refrigerado, si hay calentamiento en la pared o si las paredes están alejadas o cerca de una fuente de calor.
2. *Algoritmo TARP*, este modelo correlaciona el h_c con la orientación de la superficie y la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del aire. Se proporcionan ecuaciones para los coeficientes de transferencia de calor por convección natural en el rango turbulento para placas grandes verticales y para placas grandes horizontales.
3. *Algoritmo de convección natural simple*, en esta metodología se usan coeficientes constantes para diferentes configuraciones de transferencia de calor.
4. *Algoritmo de difusor de techo*, se basa en correlaciones empíricas, la correlación se reformuló para utilizar la temperatura de salida de la habitación como temperatura de referencia.

Coeficientes convectivos exteriores

Existen cinco metodologías que el usuario puede seleccionar para estimar el coeficiente convectivo exterior:

1. *Algoritmo simple combinado*, utiliza la rugosidad de la superficie y la velocidad del viento en la superficie para calcular el coeficiente de transferencia de calor exterior. La radiación hacia el cielo, la tierra y el aire se incluyen en el coeficiente de convección exterior para este algoritmo, y el programa calcula automáticamente esta radiación.
2. *Algoritmo TARP*, este modelo correlaciona el h_c con la orientación de la superficie y la diferencia entre las temperaturas de la superficie y del aire. Se proporcionan ecuaciones para los coeficientes de transferencia de calor por convección natural en el rango turbulento para placas grandes verticales y para placas grandes horizontales.
3. *Algoritmo MoWiTT*, los h_c contenidos en esta metodología se aplican a superficies verticales muy lisas como el vidrio de las ventanas, en edificios de baja altura; por lo que son sensibles a la velocidad del viento que varía con la altura en la superficie. Es posible que el algoritmo MoWiTT no sea apropiado para superficies rugosas, superficies de gran altura o superficies que emplean aislamiento móvil.
4. *Algoritmo DOE-2*, el modelo del coeficiente convectivo es una combinación de los modelos de MoWiTT y BLAST, que se aplica a superficies muy lisas como el vidrio.
5. *Algoritmo de convección adaptativo*, toma en cuenta la dirección del viento y las direcciones del flujo de calor, y además depende de si el flujo es forzado o natural.

Temperatura del aire en la zona térmica

Para calcular la temperatura del aire en cada zona térmica (habitación), se considera el volumen total del espacio como un punto o nodo. Se formulan balances de energía y humedad para el aire de la zona y se resuelven las ecuaciones utilizando un enfoque

predictor-corrector. Los flujos de calor considerados en el balance de energía son los provenientes del sistema de climatización, transferencia de calor entre zonas, de la infiltración y de la convección con las paredes y con objetos. En la Figura 2.6 se muestra de manera gráfica el intercambio energético y en la siguiente Ecuación de manera matemática.

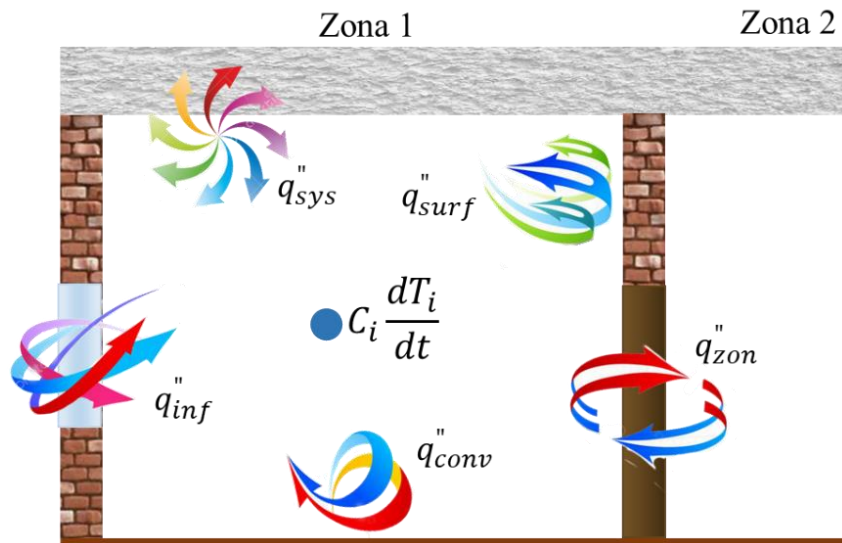


Figura 2.6 Balance de calor en la zona térmica.

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = q_{conv}'' + q_{surf}'' + q_{zonas}'' + q_{inf}'' + q_{sys}'' \quad 2.10$$

donde $C_z \frac{dT_z}{dt}$ representa la energía almacenada en la zona de aire.

q_{conv}'' representa las cargas internas convectivas producidas por equipo eléctrico y personas dentro del recinto, y se determina con las propiedades del equipo (h_i y A_i) y la diferencia de temperatura entre el equipo (T_{eq}) y el aire de la zona (T_z):

$$q''_{conv} = h_i A_i (T_{eq} - T_z) \quad (2.11)$$

En el caso de que existan varias fuentes de calor, se realiza una suma de las cargas convectivas que agrupe todos los equipos eléctricos o personas: $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$

q''_{surf} , indica la transferencia de calor por convección desde las superficies de la zona, el cual depende del área de la superficie (A_i), el coeficiente convectivo interior (h_i) y las temperaturas de la superficie (T_{surf}) y del aire de la zona (T_z), la ecuación que lo representa es la siguiente:

$$q''_{surf} = h_i A_i (T_{surf} - T_z) \quad (2.11)$$

q''_{zonas} , es la transferencia de calor debida a la mezcla de aire entre las zonas contiguas, es decir, entre habitaciones que tienen en común puertas, ventanas o huecos. El intercambio de energía se obtiene con el flujo masico de aire (\dot{m}_i) y la diferencia de temperatura entre la zona 1 (T_{z1}) y la zona 2 (T_{z2}), como sigue:

$$q''_{zonas} = \dot{m}_i C_p (T_{z1} - T_{z2}) \quad (2.12)$$

q''_{inf} , es la transferencia de calor debida a la infiltración del aire exterior por ventanas, puertas y huecos. Para obtener su valor se necesita conocer el flujo másico del aire infiltrado (\dot{m}_{inf}) y las temperaturas del aire exterior (T_∞) e interior (T_∞), el modelo que lo representa es el siguiente:

$$q''_{inf} = \dot{m}_{inf} C_p (T_\infty - T_z) \quad (2.13)$$

q''_{sys} , representa la energía (para calefacción o refrigeración) del sistema de climatización proporcionada a la zona, este balance de energía involucra el caudal másico de aire que sale del sistema de climatización (\dot{m}_{sys}) y las temperaturas del aire de suministro (T_{sumin}) y de la zona (T_z), y se calcula como sigue:

$$q''_{sys} = \dot{m}_{sys} C_p (T_{sumin} - T_z) \quad (2.14)$$

La ecuación 2.10 del balance de calor indica que la suma de las cargas de zona y la salida del sistema de aire son igual al cambio en la energía almacenada en la zona. Una vez que se sustituye cada termino en la ecuación del balance de calor y se resuelve, se obtiene la temperatura del aire de la zona para cada tiempo dado:

$$T_z^t = \frac{A + B + C + D + E - F}{G + H + I + J + K} \quad (2.15)$$

$$A = \sum_{i=1}^{n_{sl}} \dot{Q}_i$$

$$G = \left(\frac{11}{6}\right) \frac{C_z}{\delta t}$$

$$B = \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i T_{eq}$$

$$H = \sum_{i=1}^{n_{supf}} h_i A_i$$

$$C = \sum_{i=1}^{n_{zones}} \dot{m}_i C_p T_{z1}$$

$$I = \sum_{i=1}^{n_{zonas}} \dot{m}_i C_p$$

$$D = \dot{m}_{inf} C_p T_{\infty}$$

$$J = \dot{m}_{inf} C_p$$

$$E = \dot{m}_{sys} C_p T_{sumin}$$

$$K = \dot{m}_{sys} C_p$$

$$F = \left(\frac{C_z}{\delta t}\right) \left(-3T_z^{t-\delta t} + \frac{3}{2}T_z^{t-2\delta t} - \frac{1}{3}T_z^{t-3\delta t}\right)$$

2.5.2 DesignBuilder

DesignBuilder es un programa especializado en la simulación energética de edificios. Tiene una estructura modular organizada en torno a un modelador 3D, que funciona como núcleo. Actualmente el programa dispone de 9 módulos, cada uno ofrece un tipo de análisis específico. Por ejemplo, el *módulo de iluminación* que evalúa y optimiza el uso de luz natural en los edificios; el módulo de *CFD* que avalúa el movimiento del aire y la distribución de temperaturas; el módulo *HVAC* donde se simula un amplio rango de sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación; el módulo *LEED* donde se evalúa el cumplimiento de los créditos de energía del sistema de certificación LEED y el módulo *Visualización* donde se muestran los modelos virtuales con perspectivas renderizadas, es decir, con texturas fotorrealistas. Los módulos se complementan entre sí para facilitar el análisis y se pueden usar uno o varios módulos a la vez.

Algunas de las ventajas que tiene el uso de DesignBuilder es la representación detallada del modelo geométrico y de los fenómenos estudiados, obteniendo resultados aproximados en un tiempo considerablemente corto en comparación con estudios experimentales u otros métodos de cálculo. El software también incluye una paquetería con las características de los materiales de acuerdo a estándares internacionales, lo que hace que el estudio sea realista o lo más apegado posible a ella. También se tiene la facilidad de hacer modificaciones al modelo geométrico, cambiar de materiales, colores, agregar edificios contiguos y hacer una o varias simulaciones a la vez.

DesignBuilder realiza los cálculos de las simulaciones por medio de EnergyPlus, este software fue creado como motor de cálculo de otros softwares; ya que por sí solo, EnergyPlus no tiene un modelador 3D y necesita de otras extensiones para introducir parámetros y visualizar resultados. En la Figura 2.7 se ilustra el funcionamiento general

del software para realizar una simulación, la cual se constituye de cuatros grandes bloques:

1. *Parámetros de entrada*, en este apartado se introducen todas las variables necesarias para la simulación, las cuales son:
 - Crear el modelo geométrico de la edificación, con las particiones que forman las zonas térmicas (habitaciones) y las aberturas (puertas, ventanas, huecos).
 - Agregar los materiales de construcción, esto incluye el número de capas, el tipo de material y las propiedades termofísicas.
 - Indicar la actividad del edificio, esto es, el número de personas que habitan, la iluminación, uso de equipo eléctrico, de sistemas HVAC y el horario de funcionamiento.
 - Agregar el archivo de datos climáticos de la ciudad o zona donde se realiza el análisis, incluyendo la longitud y latitud.
 - Configurar los parámetros de simulación, como el paso de tiempo de la misma, el porcentaje de sombreado que hay sobre el edificio, la convergencia, los resultados que se quieren visualizar, entre otros.
2. *Simulación*, una vez que se introducen los parámetros de entrada se ejecuta el comando de simulación, que se puede realizar dentro de DesignBuilder o en EnergyPlus. Para ello se debe crear un archivo IDF (que contiene toda la información del edificio) que se abre en EnergyPlus con la información ingresada en DesignBuilder.
3. *Validación/comparación*, los resultados obtenidos en la simulación se comparan con datos reales y/o de la literatura sobre el mismo problema que se abordó, para tener la seguridad de que los resultados están en el intervalo de datos correctos. De ser el caso contrario, se revisan de nuevo los parámetros de entrada y se vuelve a simular.
4. *Resultados*, estos se pueden visualizar de forma gráfica o en un archivo xlsx.

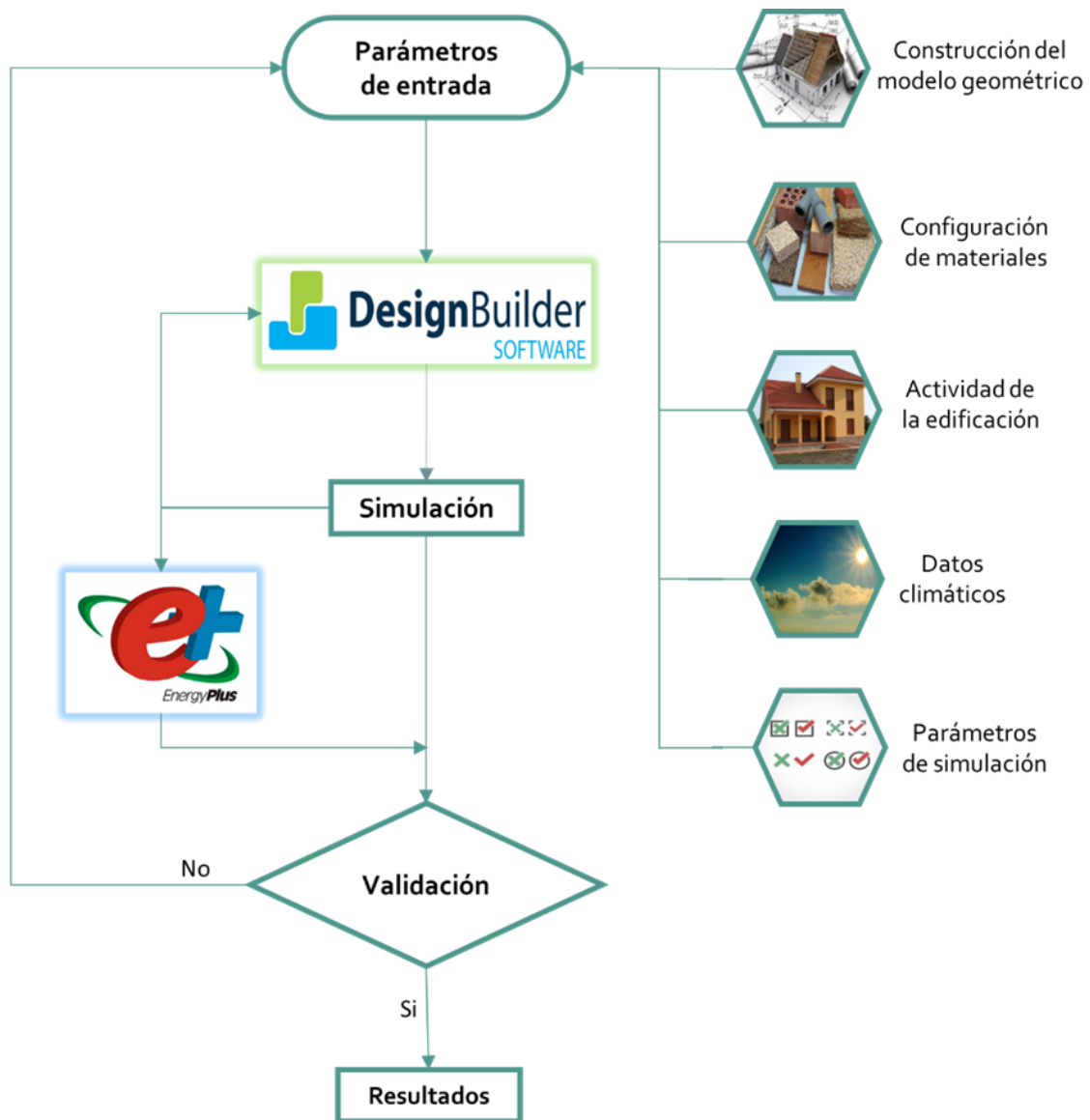


Figura 2.7 Diagrama de flujo del funcionamiento de la simulación.

Capítulo 3

Desarrollo experimental

En esta sección se describe el desarrollo experimental, el cual está compuesto por tres etapas principales:

Etapas I: Selección de la vegetación, consiste en la selección de la vegetación adecuada para formar el techo ventilado-verde. Para ello, se construyeron bases o soportes metálicos para que la vegetación creciera, se realizó la plantación de las especies y se instrumentaron los soportes. Después de cinco meses de mediciones se seleccionó una planta, con base al crecimiento, resistencia a las condiciones climáticas y comportamiento térmico.

Etapas II: Construcción de módulos de prueba, describe la construcción de cuatro módulos cúbicos de prueba para evaluar el comportamiento térmico de diferentes tipos de techos. Una vez construidos los módulos, se les agregó el techo ventilado a tres de ellos y se instrumentaron. Después de cinco meses de monitoreo se comparó el rendimiento térmico de los cuatro.

Etapa III: Validación/calibración del modelo energético/físico en el software, consiste en crear la geometría de los módulos experimentales dentro del software DesignBuilder y comparar los resultados simulados con los datos medidos.

3.1 Etapa I. Selección de la vegetación

El objetivo del proyecto fue evaluar un edificio no residencial con técnicas pasivas de sombreado en el techo, específicamente techos ventilados. Uno de los techos ventilados que se analizó fue el techo ventilado-verde, el cual se diferencia de un techo verde convencional por el tipo de vegetación y por la cantidad y ubicación del sustrato. Un techo verde común necesita una capa uniforme de sustrato en la superficie de todo el techo, además de un sistema de drenaje y capa anti raíces como componentes mínimos; mientras que el techo ventilado-verde solo requiere concentraciones de sustrato en pequeñas áreas del techo, como en macetas. Uno de los elementos principales del techo ventilado-verde es la vegetación y para tener certeza de que se usaría la más adecuada se pusieron a prueba cuatro plantas, y de ellas se seleccionó una para formar el techo ventilado-verde.

La vegetación que se propuso para el sistema de techo ventilado-verde son las enredaderas o plantas trepadoras. Estas plantas tienen características morfológicas como zarcillos, raíces aéreas y almohadillas de adhesión para sujetarse de las superficies. Pueden crecer y sujetarse directamente sobre la superficie de la pared, pero se recomienda que lo hagan sobre una estructura para evitar daños al muro, ya que, las raíces pueden provocar grietas e introducirse en ella. La estructura o soporte para las enredaderas pueden ser cables, mallas de acero, plástico, madera o aluminio que guían el crecimiento ascendente de las plantas.

Las plantas evaluadas debían cumplir con las siguientes características:

- Ser originarias de climas cálidos subhúmedos.
- Pertenecer a la región de Cuernavaca, o cercana a ella.
- Resistentes a la radiación solar directa.
- Que fueran perennifolias, es decir, que sus hojas permanezcan todo el año para garantizar un sombreado anual constante.
- Poca demanda de riego.
- Que pudieran crecer en espacios poco profundos.
- Resistentes a plagas.
- Bajo mantenimiento.

De acuerdo a todas estas características se adquirieron cuatro especies en un vivero local.

Sus nombres y rasgos morfológicos se presentan en seguida:

Nombre común: *Llamarada Sudamericana o trompeta naranja*

Género: *Pyrostegia*

Especie: *Venusta*

Es una enredadera de tallo leñoso con hojas de 4-8 cm de largo y con zarcillos que le permiten trepar superficies verticales, por medio de un soporte. Puede crecer hasta 8 m y desarrolla flores tubulares y acampanadas de color rojo-naranja en densos ramilletes de 5-9 cm. Es una planta perenne de clima tropical y subtropical que requiere exposición soleada y riego abundante. Demanda temperaturas superiores a los 14 °C. Tiene propiedades medicinales para tratar la diarrea, el vitíligo, la tos y las infecciones comunes del sistema respiratorio (como bronquitis, gripe y resfriado). (Coimbra, et al. 2019)



Figura 3.1 Planta Llamarada Sudamericana

Nombre común: *Cissus antártica*

Género: *Cissus*

Especie: *Antártica*

Es una planta trepadora que puede alcanzar los 5 m de altura. Posee zarcillos para sujetarse de las superficies, su tronco es leñoso, las hojas son simples ovaladas de 4-12 cm de largo con el contorno dentado y el fruto son esferas purpuras con un diámetro promedio de 1.5 cm. Es una planta perenne y se encuentra en climas tropicales y subtropicales (Harden, 1992).



Figura 3.2 Planta Cissus antártica

Nombre común: *Trompeta azul*

Género: *Thunbergia*

Especie: *laurifolia*

Es una enredadera que posee zarcillos para trepar por superficies verticales y puede alcanzar los 7 m de altura. El tronco es delgado y flexible, las hojas son rígidas con forma de corazón (3-8 cm), las flores son de color morado con forma de trompeta (4-7 cm) y el número de pétalos varía de 5 a 7. Posee propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y anticancerígenas. Sus ingredientes activos pueden neutralizar pesticidas, venenos de plantas y animales. (Sultana, et al. 2015)



Figura 3.3 Planta Trompeta azul.

Nombre común: *Jazmín amarillo*

Género: *Jasminum*

Especie: *Mesnyi*

Es una enredadera de tallos colgantes de hasta 4 m de altura, sus hojas alargadas son verde brillante de 3-7 cm de largo y sus flores amarillas alcanzan de 3-5 cm. Para trepar en muros requiere de un soporte ya que no cuenta con zarcillos o ventosas. Tiene frutos esféricos de 8 mm de diámetro color marrón. Se adapta a diferentes climas y resiste heladas (Universidad de Málaga, 2005).



Figura 3.4 Planta Jazmín amarillo

3.1.1 Construcción de los soportes para la vegetación

Para colocar la vegetación y formar el techo ventilado-verde se construyeron cuatro soportes de 1.20 m de lado con ángulo de acero, con una altura de 0.025 m y se les colocó una malla de acero para que la planta tenga soporte, pueda crecer y pueda sujetarse, de esta manera se formó un techo ventilado-verde. En la Figura 3.5 se observan las bases colocadas en la azotea del edificio de Cenidet-Mecánica donde se llevaron a cabo las pruebas experimentales.

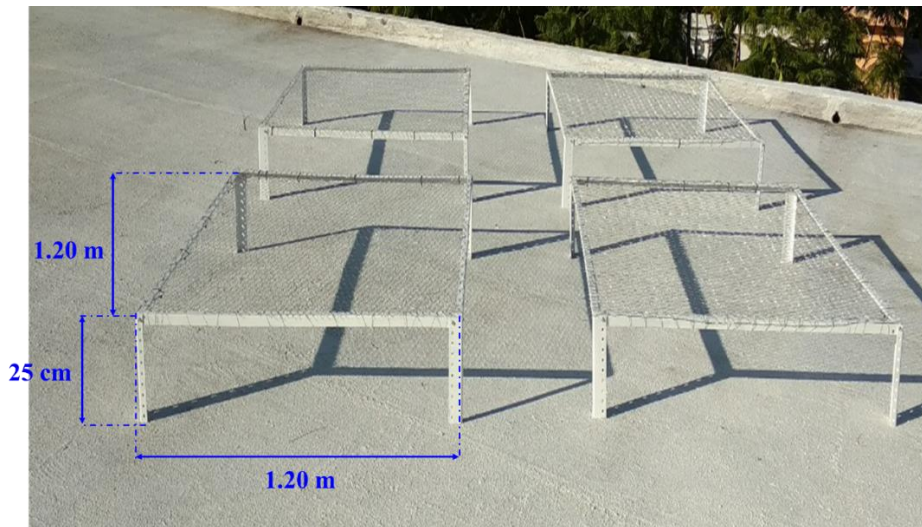


Figura 3.5 Bases para la vegetación del techo ventilado-verde.

3.1.2 Plantación de la vegetación

Los invernaderos o locales de venta de plantas, las tienen bajo ciertas condiciones para mantenerlas sanas y vigorosas. Generalmente están bajo un sombreador o están apiladas en filas y no logran recibir la radiación en todas sus hojas. Por esa razón, una vez adquiridas las plantas se colocaron en un lugar donde recibían radiación directa algunas

horas del día, y poco a poco se fueron moviendo de lugar hasta recibir radiación todo el día. Este periodo de adaptación duro cuatro semanas y se realizó antes de subir las plantas al techo de la edificación. Como el techo ventilado-verde no requiere una capa uniforme de sustrato, sino en puntos específicos, se colocó el sustrato en macetas de 8 litros de capacidad y se posicionaron en cada esquina de la base del techo ventilado (Figura 3.6a). Posteriormente se plantaron las cuatro especies en las macetas y el follaje se orientó al centro de la malla (Figura 3.6b, 3.6c).

Todo ser vivo necesita condiciones agradables para desarrollarse adecuadamente, esto incluye las condiciones ambientales y las del recinto donde se encuentra. La vegetación al tener vida también necesita de estas condiciones, de ellas depende su crecimiento y salud. La temperatura es un elemento esencial en el cultivo y desarrollo de las plantas; junto con los niveles de luz, dióxido de carbono, humedad del aire, agua y nutrientes. Todos estos factores deberían estar equilibrados, la temperatura afecta a la planta a corto y largo plazo. La mayoría de los procesos biológicos se acelerarán con temperaturas altas, lo cual puede ser positivo como negativo. Un rápido crecimiento o producción de frutos es un beneficio en la mayoría de los casos, sin embargo, la excesiva respiración de las plantas que se produce es desfavorable porque implica que quedará menos energía disponible para el desarrollo de las hojas y frutos. Reyes et al. (2016) mencionan que el sustrato debe tener una temperatura menor a 50 °C para que la planta se desarrolle apropiadamente. Una temperatura alta en el sustrato afecta la sostenibilidad de la planta al evaporar el agua almacenada más rápidamente, reduciendo así el agua disponible para las plantas y aumentando la necesidad de riego. Por encima de 35 °C no hay buen desarrollo de las raíces; considerando la idea de estos autores, se pintaron las macetas de blanco excepto una, para comparar el comportamiento del sustrato entre las macetas de diferente color (Figura 3.6d).

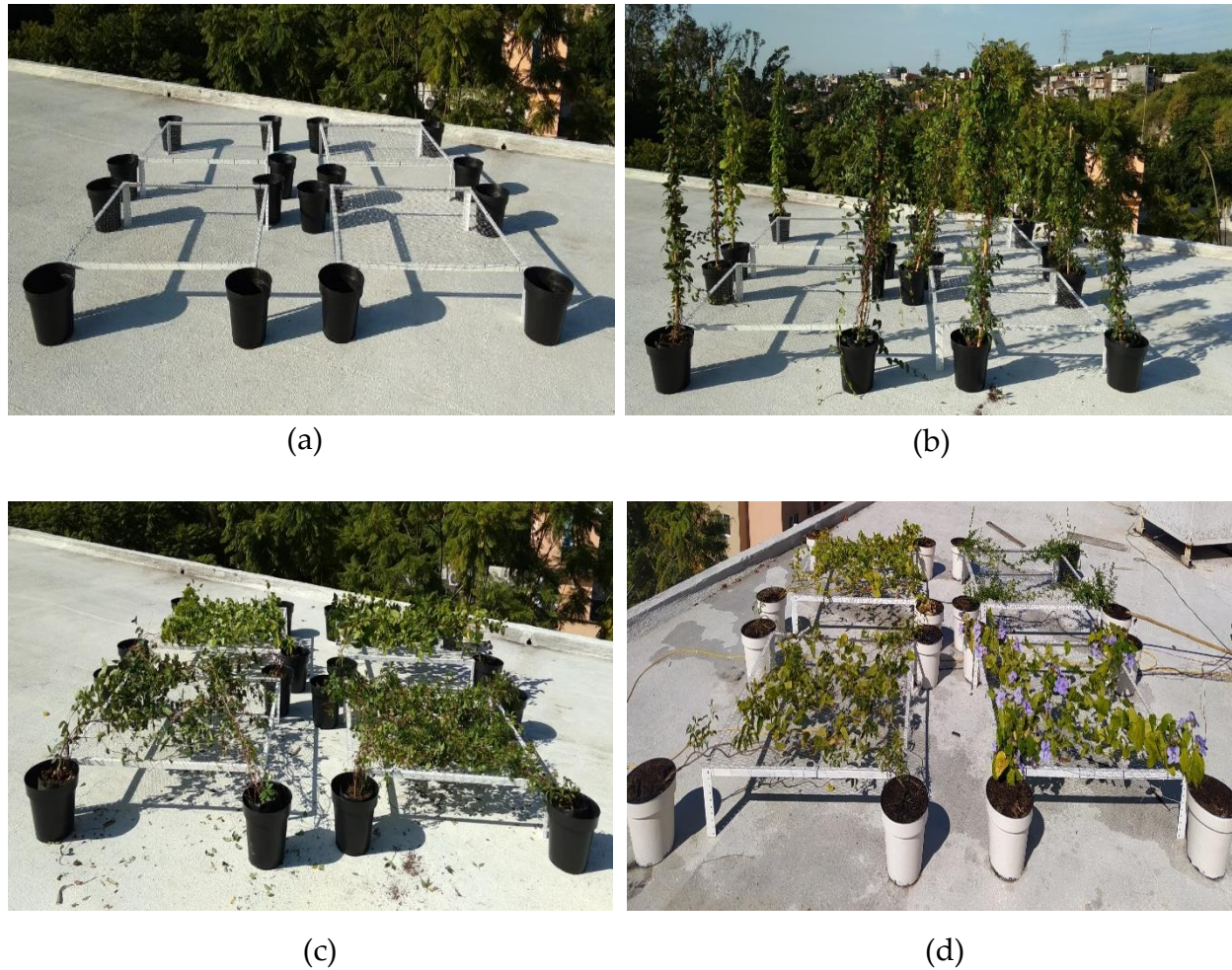


Figura 3.6 Plantación de la vegetación: (a) macetas colocadas en cada esquina, (b) vegetación plantada, (c) vegetación orientada al centro, (d) macetas pintadas de blanco.

3.1.3 Instrumentación de los techos ventilados-verdes

Para conocer el comportamiento térmico de los techos ventilados-verdes y ver si hay diferencias significativas con las diferentes especies de plantas, se midieron la temperatura en tres posiciones diferentes, la radiación solar y la cantidad de agua en el sustrato. Para medir la temperatura se colocaron termopares tipo "T" (precisión ± 0.5 °C) en la vegetación, en la superficie exterior del techo y en el canal de aire. Para medir el

contenido volumétrico de agua se instalaron dos sensores Decagon Devices EC-5 (precisión $\pm 3\%$) en dos de las macetas. Para medir la radiación que llega al techo a través de la vegetación se colocaron piranómetros Vaisala QMS101 (precisión $\pm 1\%$) debajo de la vegetación. La información de los sensores se monitoreó en un adquisidor de datos Keysight 34972A (resolución de $6\frac{1}{2}$ dígitos). En la Figura 3.7 se presenta la posición de los sensores que se colocaron en las bases del techo ventilado-verde.

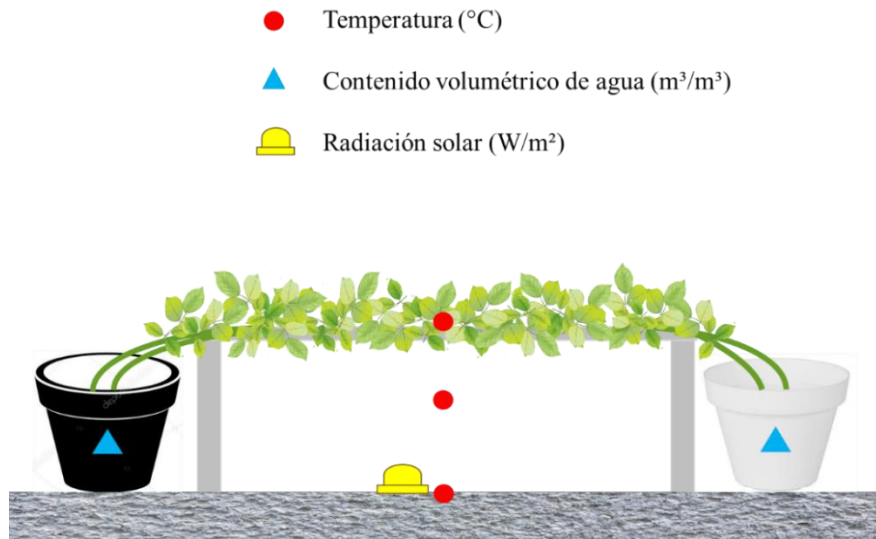


Figura 3.7 Posición de los sensores en el techo ventilado-verde.

Para la medición de las variables climáticas se cuenta en el sitio del experimento con una estación meteorológica Maws110 de la marca Vaisala (Figura 3.8). La estación cuenta con un transmisor meteorológico WXT510 que está integrado por varios sensores; el dispositivo mide velocidad y dirección del viento, presión barométrica, temperatura y humedad relativa. El sensor de velocidad de viento tiene un intervalo de medición de 0-60 m/s (precisión ± 0.3 m/s² o $\pm 3\%$), la dirección del viento puede ser medida en un ángulo de 0-360° (precisión $\pm 3\%$), la presión barométrica tiene un intervalo de medición de 600-110

hPa (precisión ± 0.5 hPa), la temperatura ambiente puede ser medida desde -52 a 60 °C (precisión ± 0.3 °C) y la humedad relativa desde 0-100% (precisión $\pm 3\%$). Finalmente, la radiación solar global se mide con un piranómetro QMS101 (precisión $\pm 1\%$).



Figura 3.8 Estación meteorológica Maws110.

3.1.4 Resultados experimentales de la evaluación de la vegetación

Las pruebas experimentales corresponden al periodo del 27 de septiembre del 2019 al 08 de marzo del 2020 (5 meses y 10 días), en esta fase de monitoreo se incluyen los meses fríos y cálidos del año, lo que permite conocer las condiciones ambientales más desfavorables para la vegetación que incluye las temperaturas más bajas del año. De esta manera la sobrevivencia de las plantas garantiza que pueden ser usadas en el techo ventilado sin el temor a que enfermen o se deterioren en el invierno, que es la estación del año más problemática para la vegetación puesta a prueba.

Los resultados se presentan del 06-15 de enero del 2020, ya que resulta complicado visualizar el comportamiento térmico de las cubiertas para los cinco meses de mediciones. Las condiciones climáticas como la temperatura ambiente, la radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento se presentan en la Figura 3.9. La temperatura ambiente no supera los 29.6 °C durante este periodo; la radiación solar se mantiene uniforme los 10 días, alcanzando su máximo valor de 12:00 a 13:00 horas; la humedad relativa se mantiene en un promedio de 36% y un máximo de 64% y por último la velocidad del viento se encuentra en el intervalo de 0.3-2.2 m/s.

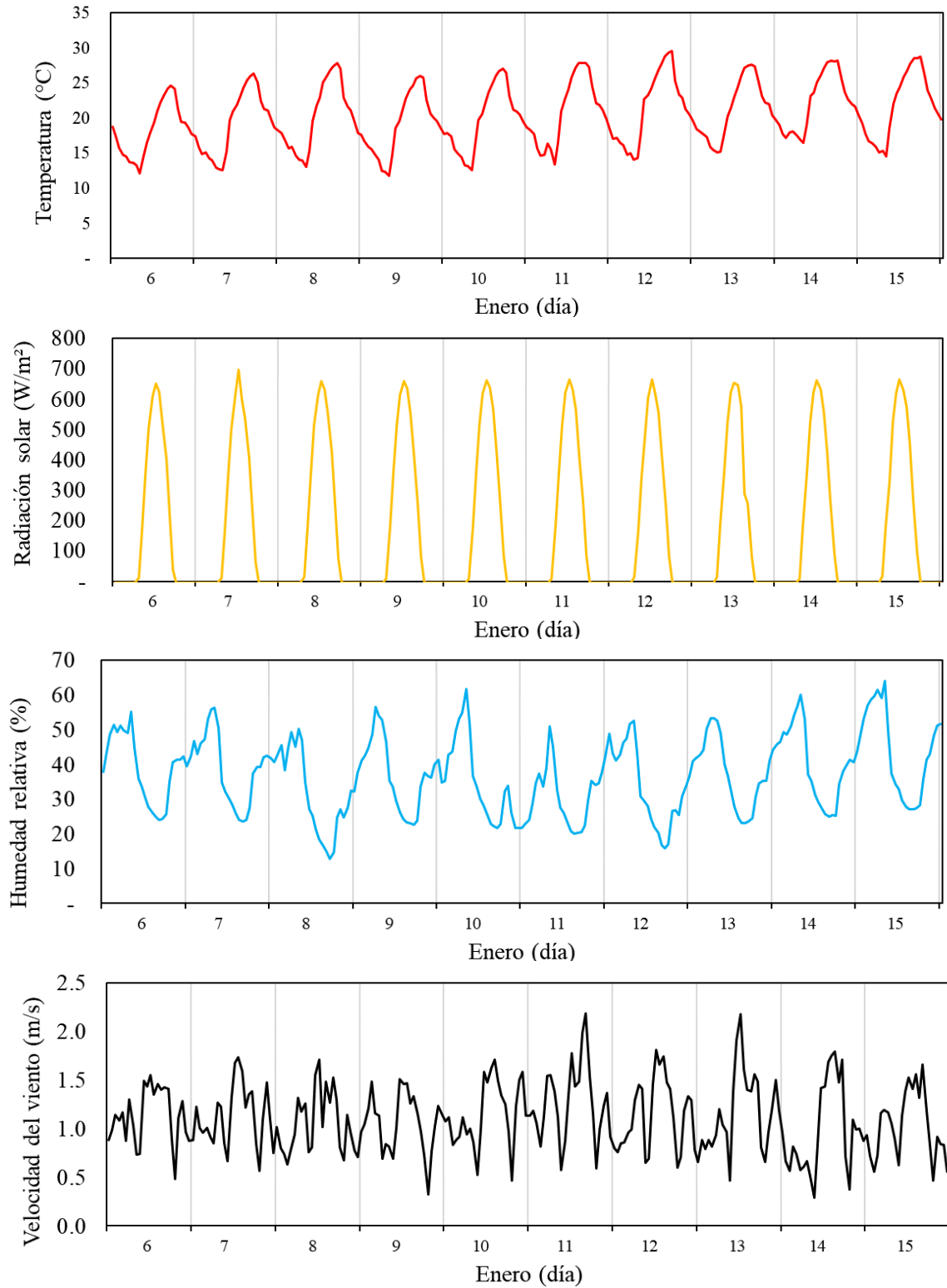


Figura 3.9 Variables climáticas en la evaluación de la vegetación.

Una de las variables medidas en los techos ventilados-verdes es la radiación que pasa a través de las hojas y llega al techo de la edificación, de esta manera se conoce el efecto de sombreado que producen las hojas de las diferentes especies. En la Figura 3.10 se observan las cuatro cubiertas, la cubierta uno (C1) tiene la vegetación *Thunbergia laurifolia*, la cubierta dos (C2) la vegetación *Cissus Antártica*, la cubierta tres (C3) *Pyrostegia Venusta* y por último la cubierta cuatro (C4) tiene la vegetación *Jasminum Mesnyi*. También se aprecian las macetas pintadas de blanco y la de control que es la maceta negra se encuentra en la cubierta cuatro.



Figura 3.10 Cubiertas ventiladas-verdes.

La vegetación *Jasminum Mesnyi* de la cubierta 4 es pequeña, no creció lo suficiente para cubrir la mayor parte del techo ventilado y hacer el efecto de sombreado, por lo que no se midió la radiación en esa cubierta, ya que era innegable que la mayor parte de radiación incidente llegaría al techo; por esa razón, en las siguientes figuras no se muestra su comportamiento térmico. En cambio, en las tres cubiertas restantes (C1, C2, C3) la vegetación fue más densa y produce cierto porcentaje de sombreado sobre el techo.

En la Figura 3.11 se muestra la radiación horaria para los diez días experimentales seleccionados en cada una de las cubiertas (C1, C2 y C3) y la radiación de la estación meteorológica (EM). El piranómetro mide la radiación en un campo de 180°, por lo que, los piranómetros colocados debajo de la vegetación además de medir la radiación solar que pasa a través de las hojas también están cuantificando la radiación reflejada de los alrededores. Cerca de las cubiertas experimentales se encuentran dos cubos de 1 m³ pintados de blanco al igual que el techo de la edificación, esto, aumenta la radiación reflejada que podría llegar a los piranómetros que se encuentran debajo de la vegetación. El piranómetro que se encuentra en la estación meteorológica no está bajo estas condiciones, se encuentra a 1.80 m sobre el techo del edificio y no existen edificios u objetos cercanos. Todo esto es la razón de que el piranómetro de la C3 presentara una radiación más alta a la radiación de la EM, además de que su follaje es más escaso.

Las cubiertas con la vegetación más densa, que bloquean un mayor índice de radiación y proporcionan más sombreado son C1 y C2. La radiación se promedió con las horas de luz solar que corresponden al intervalo de 07:00-17:00 horas. En promedio, la radiación que pasa a través de la vegetación y llega al techo de la edificación es 298.7, 265.3, 390.7 y 386 W/m² para C1, C2, C3 y EM, respectivamente. La radiación se redujo 87.3 W/m² en C1 y 120.7 W/m² en C2; esto representa una reducción promedio de la radiación solar de 31% para C2. Se puede observar que en las horas de mayor flujo solar (11:00-14:00 horas) la C2

deja pasar un menor porcentaje de radiación que las otras cubiertas, haciendo el efecto de sombreado esperado.

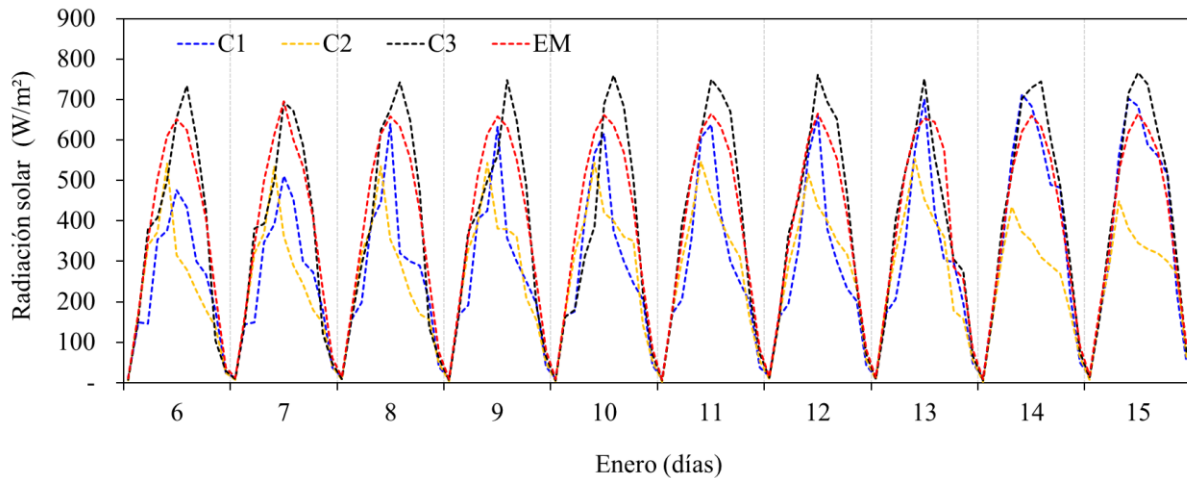
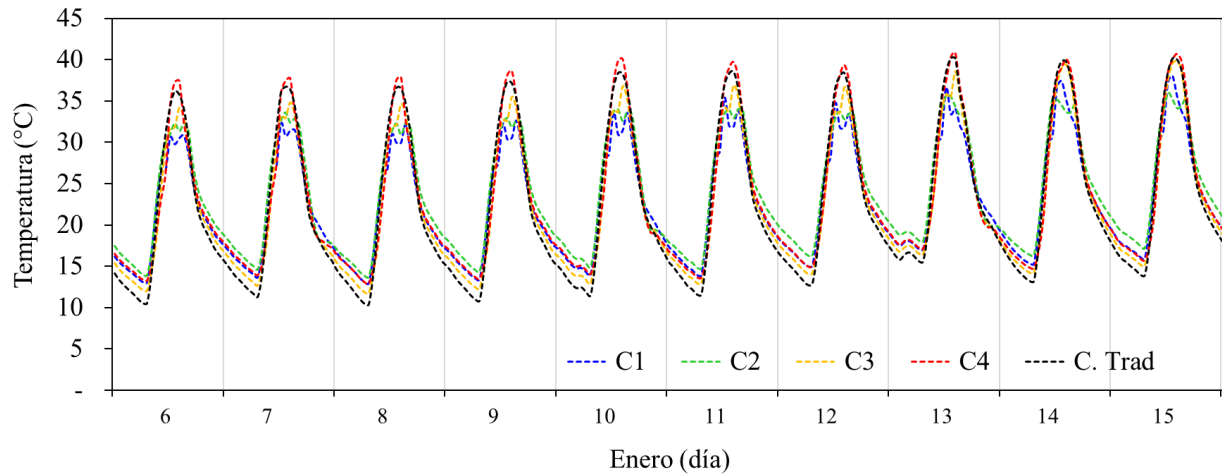


Figura 3.11 Radiación solar que pasa a través de la vegetación.

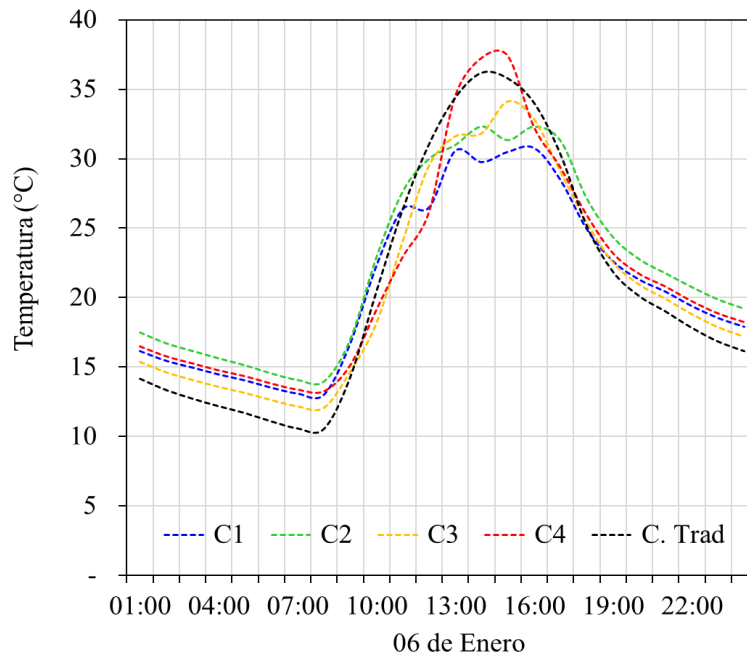
Uno de los puntos donde se midió la temperatura fue en la superficie exterior del techo de la edificación, que está a 25 cm por debajo de la vegetación de cada techo ventilado-verde, esto con la finalidad de conocer la efectividad que el sombreado proporciona. En la Figura 3.12a se presenta la temperatura en las cuatro cubiertas y en el techo tradicional (expuesto totalmente a la radiación solar). Se observa que la temperatura del techo tradicional (C.Trad) y de la C4 tienen un comportamiento muy similar, ambos presentan la temperatura más alta. Las cubiertas con mayor follaje son C1 y C2 lo que produce un mayor sombreado y por consecuencia una menor temperatura en el techo. En el punto más alto de la curva la C1 presenta 38 °C y la C2 35.9 °C, reduciendo hasta 6.8 °C respecto al techo tradicional. Por otro lado, la temperatura de C.Trad alcanza la temperatura más baja en todo el periodo, esto indica que durante el día gana más energía por estar en contacto directo con la radiación, y por las noches libera más rápidamente la energía almacenada que las otras cubiertas ventiladas. El comportamiento térmico de las cubiertas

indica la importancia que tiene el canal de aire en el techo ventilado, a pesar de que las cubiertas son relativamente pequeñas (1.44 m²) se puede apreciar que el aire funciona como un aislante que retrasa la ganancia y la pérdida de energía.

Para una mayor visualización del comportamiento térmico de las cubiertas se presenta el día 06 de enero (Figura 3.12b), se observa que la temperatura comienza a elevarse a las 8:00 h y llega a su punto máximo a las 15:00 h. Las cubiertas C1, C2, y C3 tienen un follaje que llega hasta el centro de la malla, lo que ocasiona un sombreado sobre el sensor que está en el centro del techo cuando el sol está sobre las cubiertas, es por ello que la temperatura desciende uno o dos grados alrededor de las 13:00 h, y vuela a incrementarse una hora después porque el sol se movió de posición y la radiación volvió a llegar al sensor por los huecos que se forman entre las hojas.



(a)



(b)

Figura 3.12 Temperatura en la superficie exterior del techo en cada cubierta.

En la Figura 3.13a se aprecia el comportamiento de la C2, esta cubierta fue seleccionada porque presenta un follaje más denso. Los puntos medidos fueron en la vegetación, a la mitad del canal de aire, en la superficie exterior del techo y se contrastan con la

temperatura de C.Trad. En la figura se observa que la mayor temperatura la presentó la C.Trad con 40.2 °C, mientras que la superficie del techo bajo la vegetación alcanzó una temperatura máxima de 35.9 °C. También se aprecia que la temperatura en la vegetación es la más baja en las horas de radiación en todos los días presentados, esto se debe al efecto de evapotranspiración de las plantas. Al igual que en la figura anterior (Figura 3.12) el descenso de temperatura en la superficie del techo se debe al sombreado que ocasionan las hojas sobre el techo. La temperatura de las superficies del techo muestra un comportamiento uniforme, sin subidas o bajadas bruscas de temperatura, mientras que la temperatura en la vegetación y en el canal de aire si muestran pequeñas oscilaciones de temperatura. Esto se debió a la colocación de los sensores, pues al colocarlos en la superficie del techo se sujetaron con una capa de silicón frío y los sensores que están en la vegetación y canal de aire están descubiertos (sin ninguna protección), y son más sensibles a los cambios de temperatura.

En la Figura 3.13b se muestra el comportamiento de un día completo para la cubierta 2, se observa que la temperatura en la C.Trad es la más alta en las horas de radiación y más baja por las noches, en promedio hay 2.8 °C y máximo 4.4 °C de diferencia entre la superficie del techo tradicional y la superficie con vegetación. Por otro lado, la temperatura en el canal de aire se ve afectada por el sombreado de las hojas y por la emisividad de la losa.

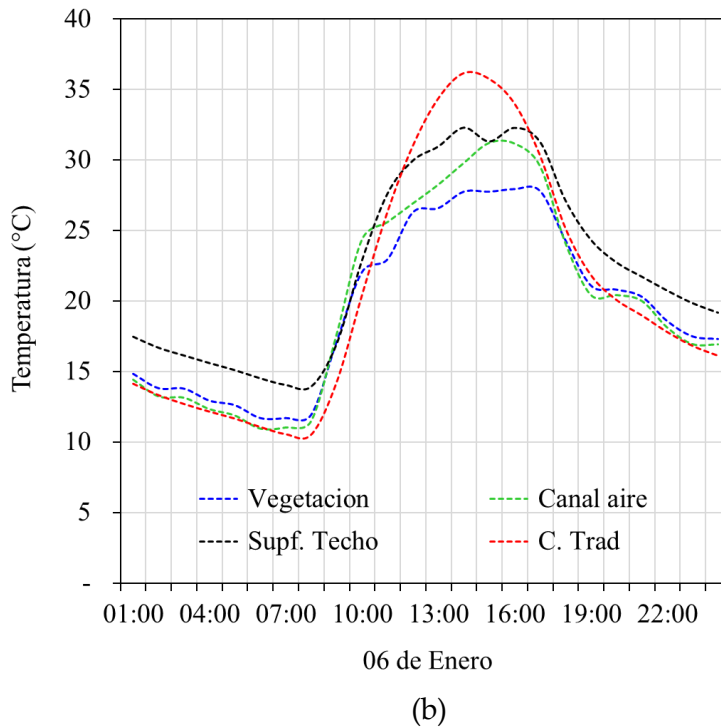
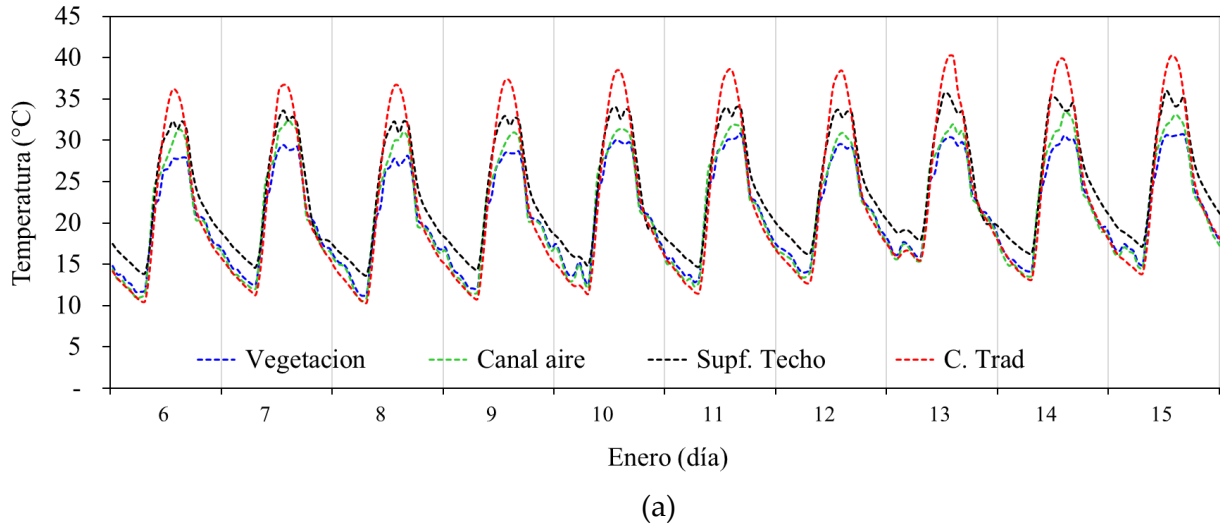


Figura 3.13 Temperatura en los diferentes puntos medidos de la cubierta 2.

En la Figura 3.14 se presenta la temperatura del sustrato en las macetas blancas y la maceta negra que se usó como referencia. Se puede observar que el sustrato de la maceta negra alcanza hasta 35.6 °C y la blanca hasta 29.9 °C el día 15 de enero. La máxima diferencia de temperatura entre las dos macetas se presentó los días 7, 10 y 13 con 9 °C. Se observa que,

durante el día la maceta negra absorbe mayor radiación solar y aumenta su temperatura, pero durante la noche libera al ambiente esta energía almacenada con mayor facilidad que la maceta blanca. El pintar las macetas de blanco también ayudó a que el sustrato retenga por mayor tiempo la humedad, al evitar que se evapore por las altas temperaturas, así el riego es más prolongado.

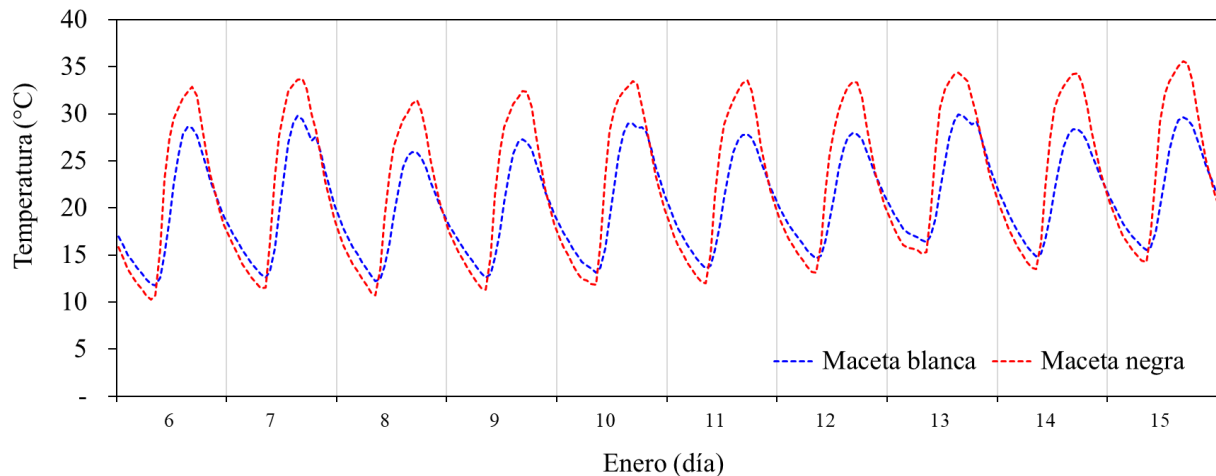


Figura 3.14 Temperatura del sustrato en macetas de diferente color.

Otro de los parámetros medidos fue el Contenido Volumétrico de Agua (CVA) en la maceta blanca y en la negra. La Figura 3.15 muestra el comportamiento de la humedad en el sustrato a lo largo de los diez días. El evento de riego se hizo el día 07, 10 y 13 de enero alrededor de las 17:00 horas con litro y medio de agua. Con el riego aumenta el CVA del sustrato rápidamente y al pasar las horas y los días disminuye la humedad del sustrato hasta llegar a un mínimo de 0.12 y 0.23 m^3/m^3 para la maceta negra y blanca, respectivamente. A lo largo de los días la maceta blanca presentó mayor contenido de humedad, por lo que se necesitó una menor cantidad de agua o prolongar más el día de riego. En promedio la maceta blanca presenta un 7% de mayor humedad en el sustrato,

respecto a la maceta negra, esto se atribuye a que la maceta negra presenta temperaturas mayores que la blanca y se evapora más rápidamente el agua.

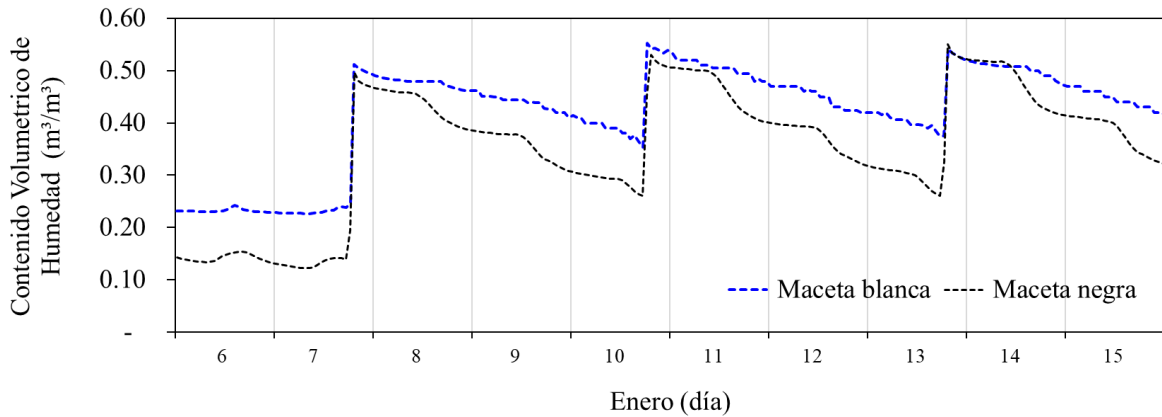



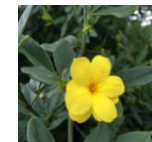


Figura 3.15 Contenido volumétrico del agua en macetas de diferente color.

Los criterios utilizados para seleccionar las plantas que pueden ser usadas en techos ventilados fueron la adaptación al clima, resistencia a plagas y enfermedades, necesidades de sol o/y sombra, tasa de crecimiento, índice de área foliar, mantenimiento, permanencia anual de hojas, el riego, la disponibilidad de las plantas en el mercado local y las dificultades de la instalación. Las especies se calificaron de acuerdo a su potencial con un puntaje del 1 al 3, donde 1 indica bajo, 2 indica medio y 3 indica alto. En la Tabla 3.1 se muestra la calificación obtenida de las cuatro especies analizadas. De acuerdo con la evaluación, la planta *Thunbergia* presentó el puntaje más bajo, esto debido a su baja capacidad de soportar altas temperaturas y radiación solar directa, también presentó un crecimiento bajo y sus hojas atraían a la araña roja y al pulgón, considerados como plagas, ya que se alimentan de la savia de la planta y le provocan que se debilite y muera. La especie *Jasminum* tiene buena resistencia a las condiciones climáticas y a los insectos, y permanece con las hojas todo el año, el inconveniente que presenta es su lento crecimiento y sus hojas pequeñas y escasas producen un sombreado pobre. Por otro lado, la planta

Pyrostegia presentó buen crecimiento e índice de área foliar, pero baja resistencia a los rayos del sol y fue la planta que requería riego con más frecuencia. Por último, la vegetación *Cissus* presentó el mayor puntaje con 37 puntos en total, esto indica que es una especie con buena adaptación al clima local, resistencia a las altas temperaturas, a la radiación solar directa y a las plagas; además presentó buen crecimiento para proporcionar sombreado sobre el techo de la edificación. De acuerdo con los aspectos físicos y biológicos que se evaluaron en las cuatro especies, y con los parámetros medidos (temperatura, radiación y contenido volumétrico de agua) que sirvieron para conocer el comportamiento térmico de la vegetación, se seleccionó la especie *Cissus* como la mejor opción para ser usada en el módulo experimental con techo ventilado-verde.

Tabla 3.1 Criterios de evaluación para seleccionar la vegetación adecuada.

Criterio				
	Pyrostegia	Cissus	Thunbergia	Jasminum
Capacidad para soportar altas temperaturas	3	3	1	3
Capacidad de soportar la exposición directa a la radiación solar	2	3	1	3
Capacidad para soportar periodos largos sin riego	1	3	2	3
Capacidad para crecer de manera horizontal	2	3	3	3
Longitud de la planta	3	3	1	2
Rapidez de crecimiento	2	3	1	1
Índice de área foliar	3	3	2	1
Facilidad de instalación	3	3	2	2
Mantenimiento, deshierbe y fertilización	1	1	3	1
Resistencia a plagas e insectos	2	3	1	2
Disponibilidad en el mercado local	3	3	3	3
Capacidad de crecer en sustrato poco profundo	3	3	2	2
Permanencia de hojas todo el año	3	3	2	3
Total	31	37	24	29

3.1.5 Conclusiones de la etapa I

- La vegetación más densa que logró bloquear un mayor índice de radiación y proporcionar más sombreado al techo son la especie *Thunbergia laurifolia* y *Cissus Antártica*, posicionadas sobre las cubiertas C1 y C2.
- La C2 presentó una reducción promedio de la radiación solar del 31% respecto al techo tradicional.
- La cubierta C1 y C2 redujeron hasta 6 °C la temperatura de la superficie del techo, respecto al techo tradicional.
- El sustrato de la maceta negra presentó mayor temperatura que la maceta blanca, esto debido a que la maceta negra absorbe mayor radiación solar.
- En promedio la maceta blanca presentó un 7% de mayor humedad en el sustrato respecto a la maceta negra.
- La vegetación seleccionada para usarse en el módulo experimental es *Cissus antártica*.

3.2 Etapa II. Construcción de módulos de prueba

En la etapa II del desarrollo experimental se construyeron los módulos de prueba que se componen de cuatro unidades principales: una estructura metálica que resguarda una caja de madera (pintada de blanco al exterior y recubierta de aislante al interior) y que soporta una losa de concreto. En la Figura 3.16 se muestra un esquema con los componentes de los módulos de prueba. En el diseño de los módulos se consideró que estarían expuestos al ambiente, por lo que se les dio un acabado para que resistieran las condiciones climáticas. Se construyeron cuatro módulos con la estructura base igual, lo único en que varían es en el techo ventilado. La finalidad de los módulos de prueba es determinar la temperatura en su interior y en las diferentes superficies de los techos, para evaluar de manera simultánea el comportamiento térmico de un techo convencional y de tres tipos de techos ventilados. De esta manera se conocerá la reducción de temperatura

al interior de los módulos y de la superficie de las losas, debido al bloqueo de la radiación solar por parte de los techos ventilados.

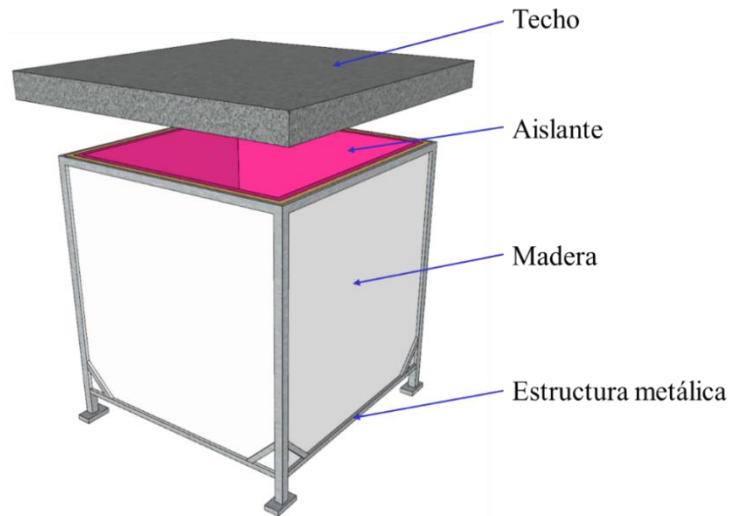


Figura 3.16 Componentes del módulo de prueba.

3.2.1 Construcción de los módulos de prueba

Los módulos se construyeron en varias etapas. Primero se construyeron las cajas de madera de largo, ancho y alto de un metro. El material que se utilizó es OSB (*oriented strand board*) de 2.54 cm (1") de espesor, este es un panel prensado en el que se unen largas hebras de madera con un adhesivo de resina sintética. Su conductividad térmica es de 0.13 W/mK y una densidad de 650 kg/m³ (Wood Panel Industries Federation et al., 2014). La unión de las paredes para formar la caja se hizo con clavos y pegamento; en la Figura 3.17 se puede apreciar el proceso de la unión de las paredes con pinzas de presión.

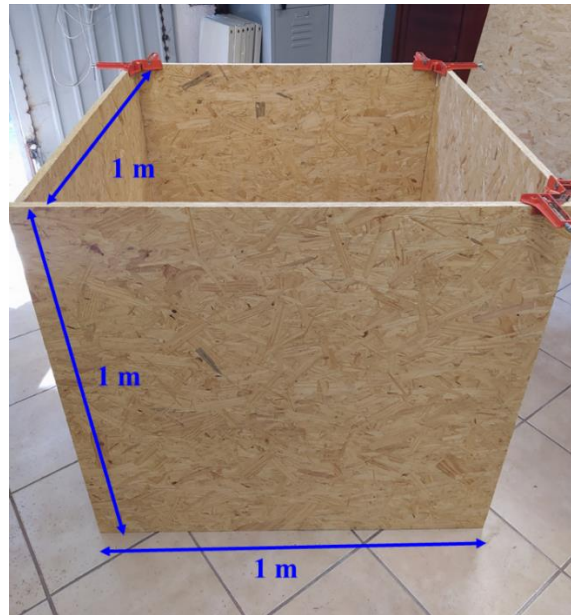


Figura 3.17 Caja de madera OSB.

Para que la transferencia de calor al interior de los módulos de prueba fuera en mayor medida por el techo se colocó al interior un aislante y así reducir las ganancias de calor por las paredes y suelo. El aislante utilizado fue poliestireno extruido de 2.54 cm (1") de espesor llamado Foamular® 250; la conductividad térmica y densidad es de 0.0288 W/mK y 40.27 kg/m³, respectivamente (Owens Corning, 2016). Para proteger la madera de las condiciones externas se aplicaron dos capas de sellador y dos capas de pintura blanca en la superficie exterior del OSB. En la Figura 3.18 se puede apreciar la caja con el aislante y la capa de pintura al exterior.



Figura 3.18 Caja pintada con aislante.

Para resguardar la caja de madera y soportar las losas se construyeron cuatro estructuras de metal con ángulos de acero de 2.54 cm (1") y 3.81 cm (1 1/2"). La estructura es básicamente un cubo con cuatro soportes de 15 cm de altura del suelo, para evitar la transferencia de calor por conducción del suelo o espacio en donde fueron colocadas, la estructura se puede apreciar en la Figura 3.19.



Figura 3.19 Estructura para soportar la losa.

Para la elaboración de las losas se construyeron moldes de madera OSB de 1.2x1.2x0.1 m (Figura 3.20a). Para dar soporte al concreto se colocó malla electrosoldada y se colocaron agarraderas de varilla de 0.9525 cm (3/8") en cada lado de la losa, para sujetarla y que fuera más fácil su traslado. También se aplicó una capa de aceite quemado al interior de los moldes para que fuera más fácil quitarlos (Figura 3.20b). Posteriormente, se hizo la mezcla para las losas agregando cemento, arena, grava y agua y se vertió en los moldes de madera. En este paso se colocaron tres termopares para medir la temperatura al interior de la losa (Figura 3.20c). Una vez terminadas las losas se dejaron secar por dos semanas y se les agregó agua continuamente para evitar que se agrietaran, pasado este tiempo se quitó el molde (Figura 3.20d).

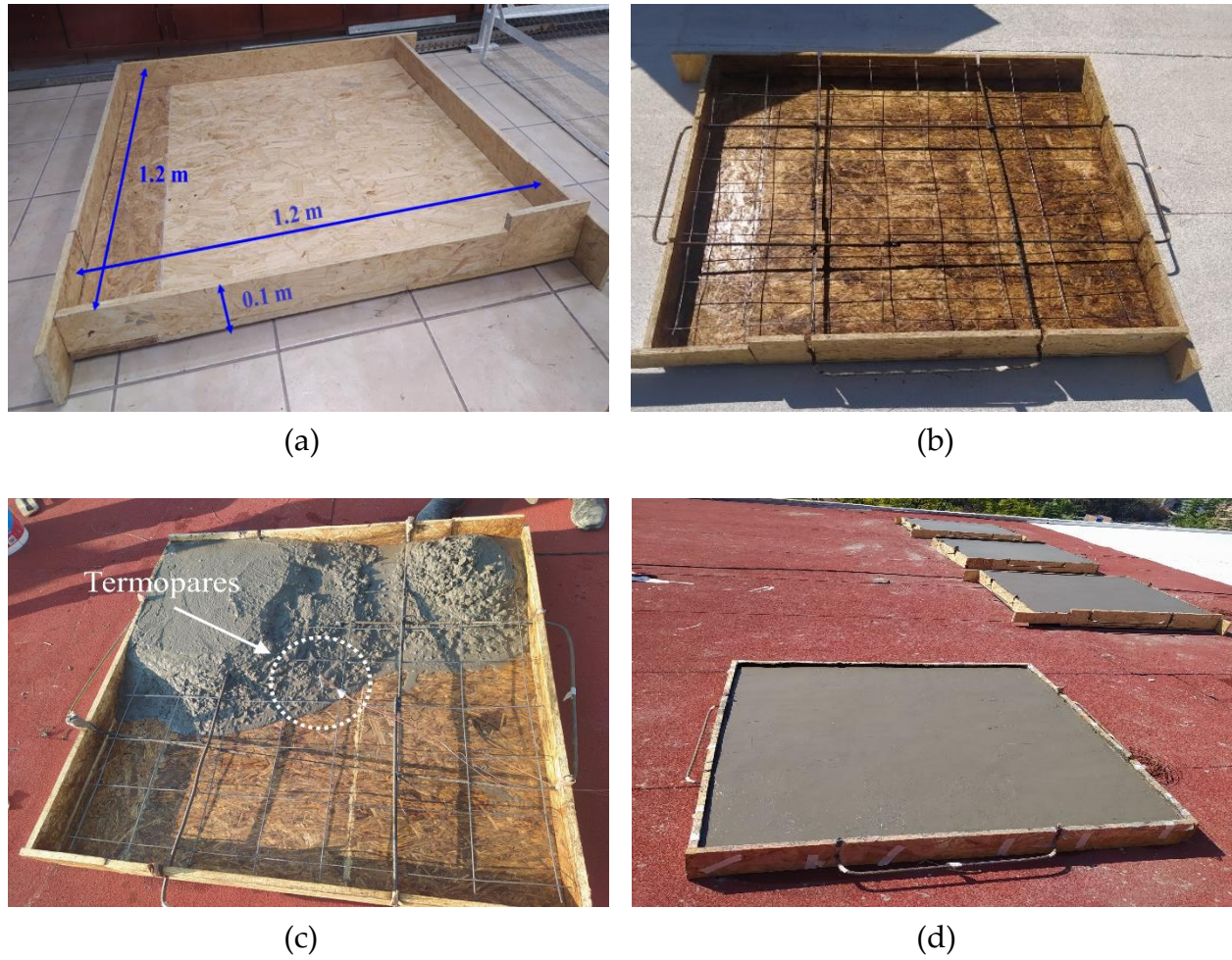


Figura 3.20 Construcción de las losas de concreto: (a) molde de madera, (b) molde con malla electrosoldada, (c) colocación de termopares, (d) losas terminadas.

En la Figura 3.21 se presenta el acople de todos los componentes y las dimensiones de los módulos de prueba.

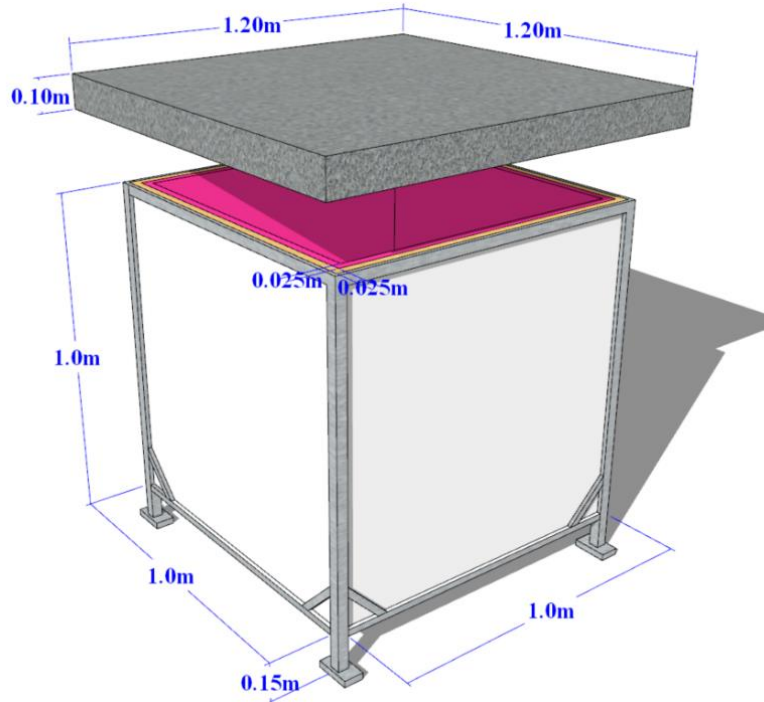


Figura 3.21 Módulo de prueba.

El peso de la losa se estima en 345.5 kg, este valor se obtuvo al multiplicar el volumen de la losa (0.152 m^3) por la densidad del concreto (2400 kg/m^3) (National Ready Mixed Concrete Association, 2020; Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, 2017). Este peso no es fácil de mover por lo que se diseñó y construyó una estructura para levantar las losas y ubicarlas en el lugar deseado. El material que se utilizó fueron perfiles rectangulares de 3.81 cm (1 1/2") y 5.08 cm (2"), y a los extremos se colocaron dos malacates con capacidad máxima de arrastre de 1,100 kg cada uno (Figura 3.22).

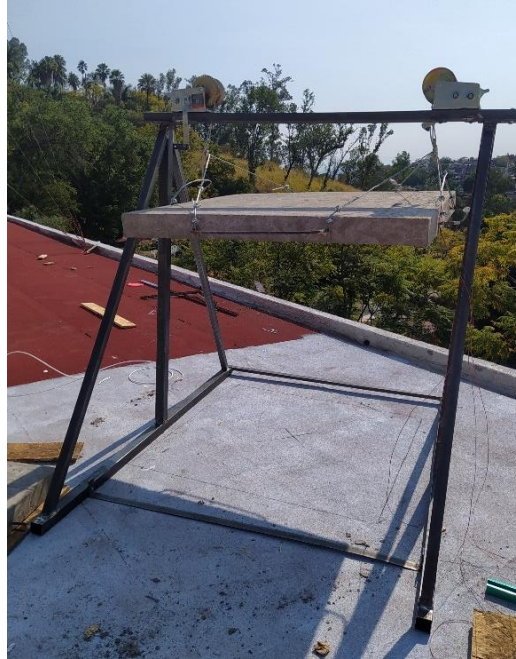


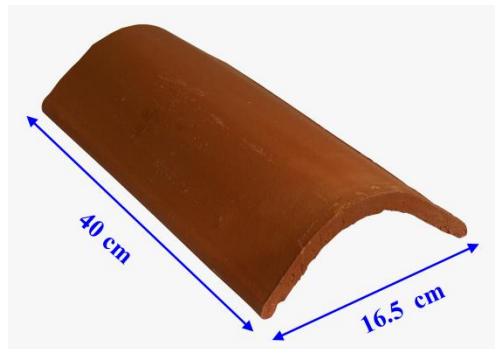
Figura 3.22 Estructura para levantar las losas.

3.2.2 Construcción de los techos ventilados

Techo ventilado con teja

Para formar este techo se construyó una estructura de solera de 2.54 cm (1") que soporta las tejas y está sujeta a soportes de ángulo de 3.81 cm (1 1/2 ") que llegan hasta el piso. Las tejas utilizadas son de barro modelo Media caña de 40 cm de longitud (Figura 3.23a). Para cubrir el área del techo se utilizaron 52 tejas con un peso promedio de 1.53 kg cada una, lo que proporciona un peso extra al módulo de prueba de 79.5 kg por las tejas. Para evitar que el agua se acumule y tenga un mejor escurrimiento se utilizó una pendiente de 7°, y de acuerdo a los fabricantes la mínima es de 5° (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2011). En la construcción de los techos ventilados se consideró que fueran del área de la losa por las limitaciones del espacio donde se colocaron, ya que solo se podían colocar en línea sobre las columnas de soporte del edificio, esto con la finalidad de evitar daños a la

estructura por el peso de las cuatro losas de los módulos. Al construir los techos ventilados con un área mayor se requería de un espacio más amplio para colocar los módulos y para que no se fueran a dar sombra entre ellos. En la Figura 3.23b se presenta la construcción final del techo ventilado con teja.



(a)



(b)

Figura 3.23 Techo ventilado con teja: (a) medidas de las tejas, (b) techo terminado.

Techo ventilado con lámina galvanizada

Este techo está formado por una lámina galvanizada lisa de 1.2x1.2 m que está sujeta a soportes de ángulo de 3.81 cm (1 1/2 ") que llegan hasta el piso, en la Figura 3.24 se aprecia el techo ventilado.



Figura 3.24 Techo ventilado con lámina galvanizada.

Techo ventilado con vegetación

Otro de los techos ventilados que se analizó es el formado con vegetación. Para crear el techo ventilado se construyó una base de ángulo de 2.54 cm (1") con malla de acero al centro para soportar la vegetación (Figura 3.25a). La vegetación óptima es *Cissus Antártica* (Figura 3.25b) de acuerdo a la primera parte experimental (sección 3.1) donde se analizó el crecimiento y resistencia de varias especies. La vegetación se plantó en macetas con diámetro de 28 cm y capacidad de 8 l, se colocaron en cada esquina de la losa y se orientó la vegetación al centro de la malla.



Figura 3.25 Componentes para formar el techo ventilado-verde: (a) base para soportar la vegetación, (b) vegetación.

El sustrato es de suma importancia para que la vegetación crezca de manera adecuada y resista las condiciones de radiación directa durante todo el día. Un buen sustrato debe contener tres elementos fundamentales, debe aportar alimento a las plantas, humedad y buen drenaje. Para que el sustrato retenga por mayor tiempo la humedad se utilizó fibra de coco; como alimento para las plantas se utilizó humus de lombriz que es un fertilizante orgánico y para un buen drenaje y aireación del sustrato se usó perlita (Figura 3.26a). Para dar mayor consistencia al sustrato se agregó tierra negra común, además de la propia tierra que tenían las plantas cuando se adquirieron que en su mayoría era corteza de árbol y hojas secas. Una vez que se tenían todos los ingredientes se mezclaron para obtener una mezcla homogénea (Figura 3.26b).

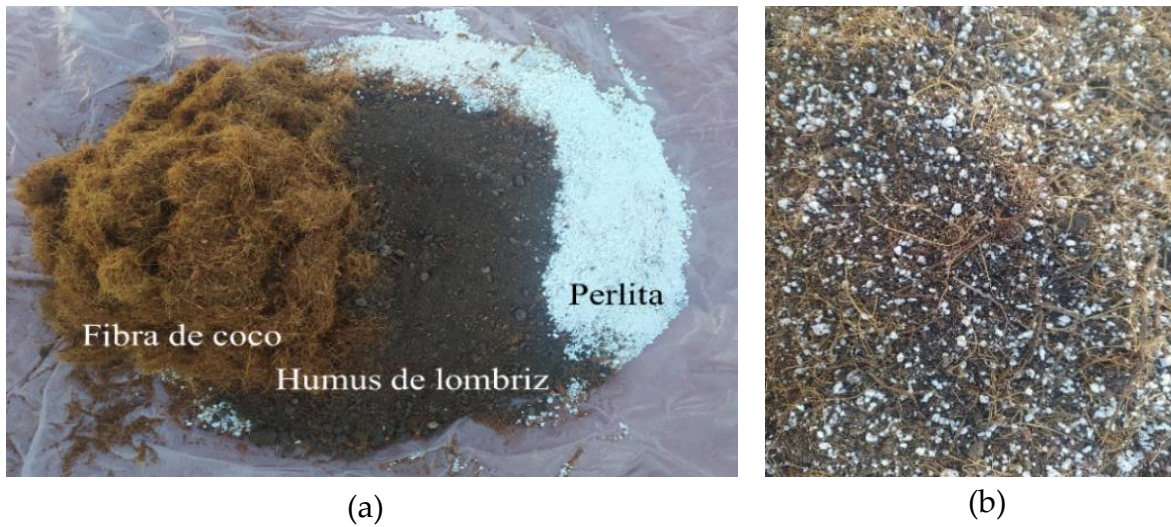


Figura 3.26 Sustrato: (a) elementos del sustrato, (b) mezcla homogénea

Para resguardar de la intemperie al sistema de adquisición de datos se fabricó un cubo de lámina galvanizada de 1.2x0.6x0.4 m con ángulos de acero de 1.27 cm (1/2"). Se pintó de blanco y se colocó Foamular 250 al interior para reducir las ganancias de calor por radiación hacia el interior (Figura 3.27).



Figura 3.27 Cubo para resguardar el sistema de adquisición de datos.

En la Figura 3.28 se pueden apreciar los cuatro módulos construidos, el primero tiene la cubierta ventilada de tejas, el segundo tiene la vegetación con las macetas posicionadas en cada esquina, el tercero cuenta con lámina galvanizada como techo ventilado y el cuarto representa un techo convencional sin ningún recubrimiento o techo extra, que se toma como referencia. El canal de aire es de 15 cm de espesor, de acuerdo a Beltrán (2018) se recomienda un canal mayor a 10 cm para climas cálidos. Los módulos de prueba se instalaron en la azotea del edificio de Cenidet Mecánica con el fin de evitar sombra de árboles o edificios contiguos y que pudieran recibir radiación solar la mayor parte del día.

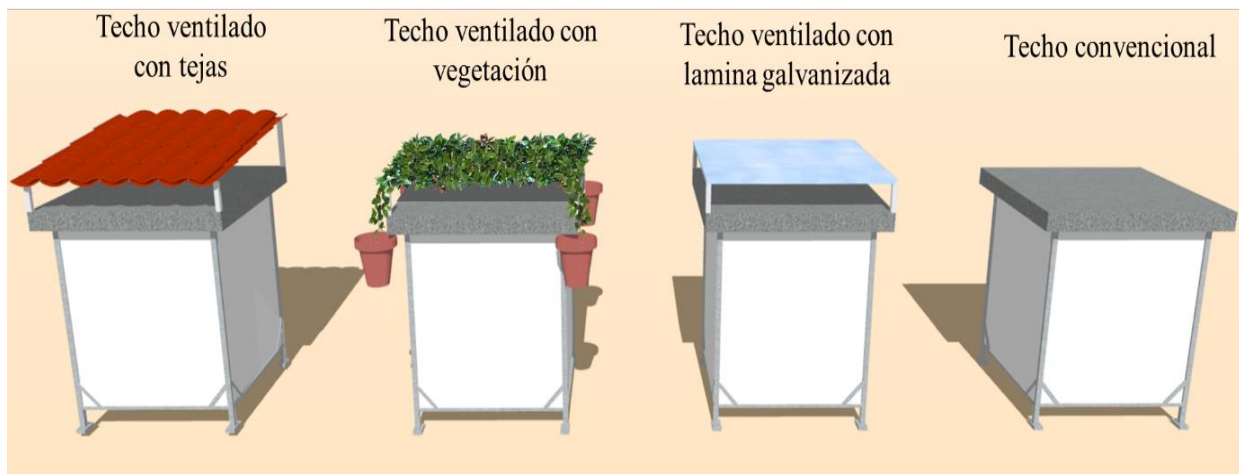


Figura 3.28 Techos ventilados y techo convencional.

3.2.3 Instrumentación de los módulos de prueba

Para conocer el comportamiento térmico de los techos ventilados y analizar si hay diferencias significativas con las diferentes cubiertas, se midió la temperatura en diferentes posiciones de los módulos de prueba. Para medir la temperatura dentro de las losas se colocaron tres termopares tipo “T” () en forma vertical en el centro de la losa; en el canal de aire de los techos ventilados se usaron sensores digitales DS18B20 (± 0.5 °C); y se colocaron termistores NTC de $10\text{ k}\Omega$ (± 0.5 °C) al interior de los módulos en forma

vertical, en la superficie exterior de la losa, en las dos superficies del techo secundario (interior y exterior) y a 35 cm de altura del techo secundario para monitorear la temperatura del ambiente cercano que los techos pudieran ocasionar. En la Figura 3.29 se observa la posición y tipos de sensores utilizados.

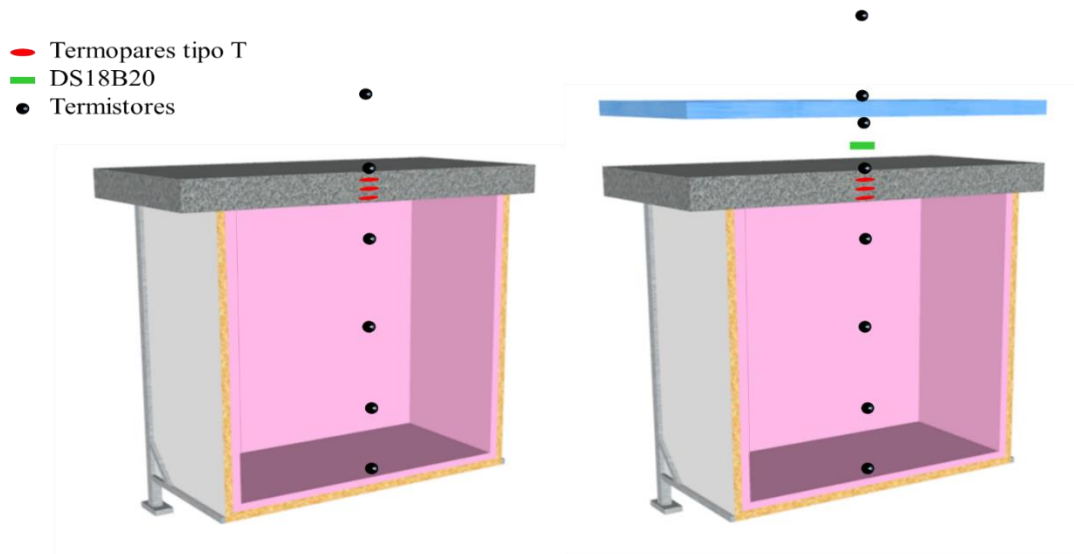


Figura 3.29 Posición de los sensores en los módulos de prueba.

Calibración de sensores

Para saber que el dato medido por los sensores es correcto hay que comparar estos valores con un valor de referencia, es por ello que se calibraron los sensores con tres puntos diferentes de temperatura. Los termopares tipo T al ser de límite especial de error, el fabricante menciona que no es necesario calibrarlos, es por ello que se toman como temperatura de referencia. La temperatura baja y alta se obtuvo con dos celdas peltier TEC1-12706 de 60 W. Para obtener los datos a la temperatura más baja se colocaron los sensores sobre la cara fría de la celda, mientras que en la superficie caliente se colocó un

disipador de calor. Para la temperatura más alta se colocaron los sensores sobre la cara caliente de la celda y la temperatura intermedia se obtuvo de la temperatura ambiente. Las celdas peltier y los sensores se colocaron dentro de una caja aislada para un mayor control de las condiciones ambientales y se registraron los valores cada 30 segundos durante cuatro horas. En la Figura 3.30 se puede observar el comportamiento de los sensores en los tres puntos de temperatura, 15, 33 y 64 °C después de que se hizo el ajuste y la transformación de resistencia a temperatura, en el caso de los termistores. Se puede apreciar que los sensores tienen un comportamiento bastante estable y casi idéntico a la temperatura de referencia (línea punteada roja).

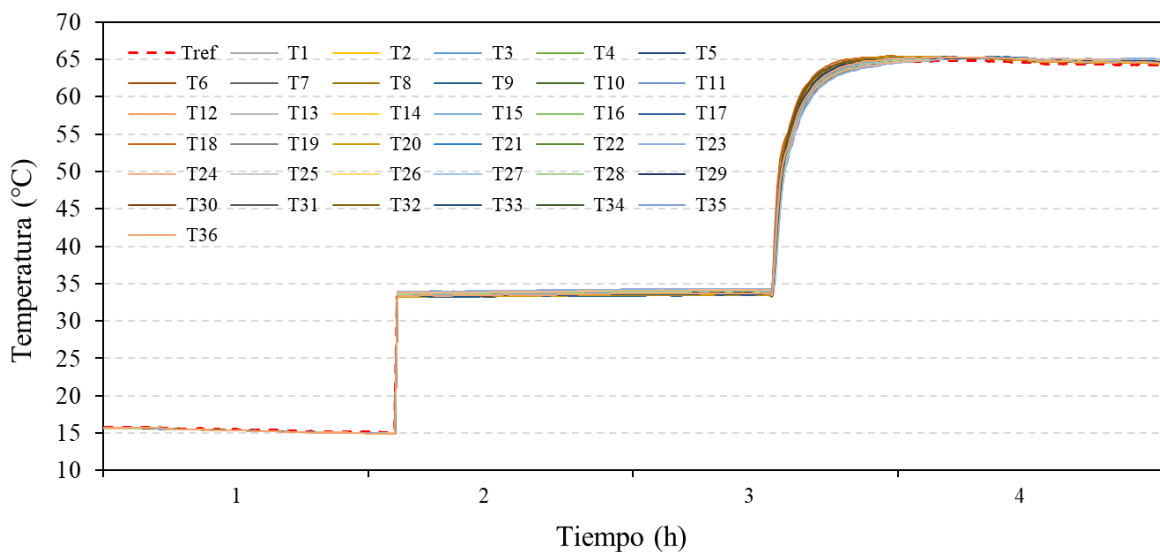


Figura 3.30 Temperatura del sensor de referencia y los calibrados.

En la Figura 3.31 se muestra la colocación de los sensores en los diferentes puntos. Los sensores que van en las superficies externas se cubrieron con papel aluminio para que la radiación no afecte la medición de la temperatura. También se pueden observar los sensores en la superficie inferior, en el canal de aire y a los 35 cm del techo secundario.



Figura 3.31 Colocación de sensores en los diferentes techos.

Para el registro y adquisición de las variables medidas de los módulos de prueba se utilizó un sistema de adquisición de datos. Los termopares se conectaron a una tarjeta multiplexora Agilent 34902A que a su vez se conectó a un multímetro Agilent 34972A (resolución de $6\frac{1}{2}$ dígitos). Los sensores DS18B20 y termistores se conectaron a un sistema de adquisición con Arduino, ambos sistemas registraron los datos en una memoria extraíble, y la medición de las variables climáticas se realizó con la estación meteorológica Maws110 de la marca Vaisala (descrita en la sección 3.1.3.). En la Figura 3.32 se observa el sistema de adquisición de datos.



Figura 3.32 Sistema de adquisición de datos.

Una vez acoplados todos los componentes de los módulos de prueba (cubos, losas, techos ventilados) se colocaron los sensores en el sitio correspondiente y se conectaron al sistema de adquisición de datos. Los módulos y el registro de datos fueron puestos en marcha el día 05 enero del 2021 y en la Figura 3.33 se puede observar la apariencia final de la instalación experimental.



Figura 3.33 Instalación experimental con los módulos de prueba.

3.2.4 Resultados experimentales de los módulos de prueba

La adquisición de datos comprende el periodo del 05 enero al 15 de junio del 2021 (5 meses y 10 días), en este periodo se cuenta con enero y febrero considerados meses de clima frío, y con abril y mayo considerados como meses de clima cálido. Así, al tener estos dos periodos se puede tener un análisis más completo del comportamiento de los módulos de prueba. En la Figura 3.34 se muestran las variables climáticas del periodo de medición, se observa que la temperatura ambiente no superó los 35 °C y la temperatura más baja que se presentó fue en febrero. La humedad relativa fue mayor en enero y mayo alcanzando un máximo de 83% en el mes de mayo. La radiación solar presentó un comportamiento ascendente a lo largo del periodo de medición, siendo mayo donde se presentaron los días con radiación que alcanza hasta los 1200 W/m². Y finalmente, la velocidad del viento en promedio es de 1 m/s, solo en escasos días se presentó un viento mayor a los 3 m/s. En la Tabla 3.2 se observan los promedios mensuales de cada variable medida.

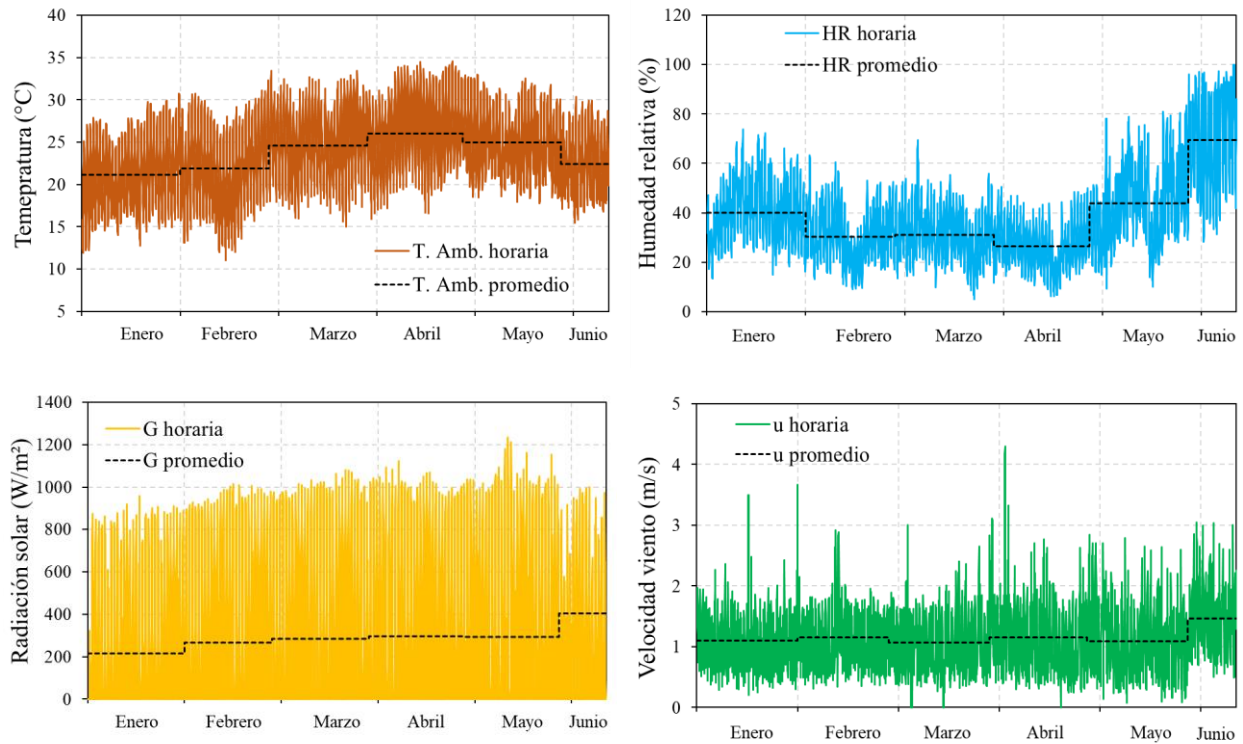


Figura 3.34 Variables climáticas del monitoreo de los módulos.

Tabla 3.2 Valores puntuales de las variables climáticas.

Variables climáticas	Mínimo	Máximo	Promedio
Temperatura ambiente (°C)	11.1	34.6	23.6
Radiación solar (W/m ²)	0	1233.7	278.0
Humedad relativa (%)	5.1	100.0	37.6
Velocidad del viento (m/s)	0.1	4.3	1.1

De acuerdo a la temperatura ambiente (Figura 3.34) el mes más frío es febrero y el más cálido abril. De estos dos meses se tomará la semana más fría (12-18 febrero) y la más cálida (12-18 abril) para discutir los resultados, así se asegura que cualquier comportamiento se presenta en ese intervalo de temperaturas. A continuación, se describen los resultados del comportamiento térmico de los módulos de prueba, se hace una comparativa de la temperatura interna de las cavidades, de la temperatura interna de

las losas y de la temperatura de las superficies de los techos secundarios de los cuatro módulos de prueba.

Temperatura interna con los diferentes techos

En la Figura 3.35 se muestra la temperatura interna de los cuatro módulos para la semana fría y cálida. En la semana fría la temperatura interna más baja estuvo cercana a los 5 °C en la mayoría de los días, excepto el día 15 que sí alcanzó los cinco grados. Las temperaturas más bajas y más altas las alcanza el módulo con techo tradicional en ambas semanas, esto debido a que la losa está en contacto directo con el ambiente y gana y pierde energía más rápido que los otros módulos, esto se debe a que no cuenta con ningún techo secundario y la ventilación e intercambio convectivo es mayor. El módulo tradicional alcanzó una temperatura máxima de 37.6 °C en la semana fría y de 44.4 °C en la semana cálida. En los días fríos el módulo con techo de teja redujo la temperatura hasta 10.6 °C, el de lámina 8.7 °C y el de vegetación 7.7 °C, respecto al techo tradicional. En los días cálidos el módulo de teja redujo la temperatura hasta 10.9 °C, el de vegetación 10.8 °C y el de lámina 9.3 °C, respecto al techo tradicional. En ambos periodos, el techo que redujo mayormente la temperatura fue el de teja, y el de vegetación presentó mejores resultados en la temporada cálida, se asume que fue porque la vegetación creció desde que se plantó en enero. La temperatura interna en el módulo de teja se debe a tres aspectos: a la sombra uniforme que proyecta el techo secundario sobre la losa de concreto; a los canales de aire que se forman entre las tejas, pues esto genera una capa aislante extra; y al espesor y propiedades térmicas de la teja. Las temperaturas más altas de los cuatro módulos se presentaron de 14:00 a 18:00 horas y las más bajas de 4:00 a 7:00 horas. En ambas semanas el comportamiento de la temperatura interna de los módulos con techo ventilado es semejante a la temperatura ambiente.

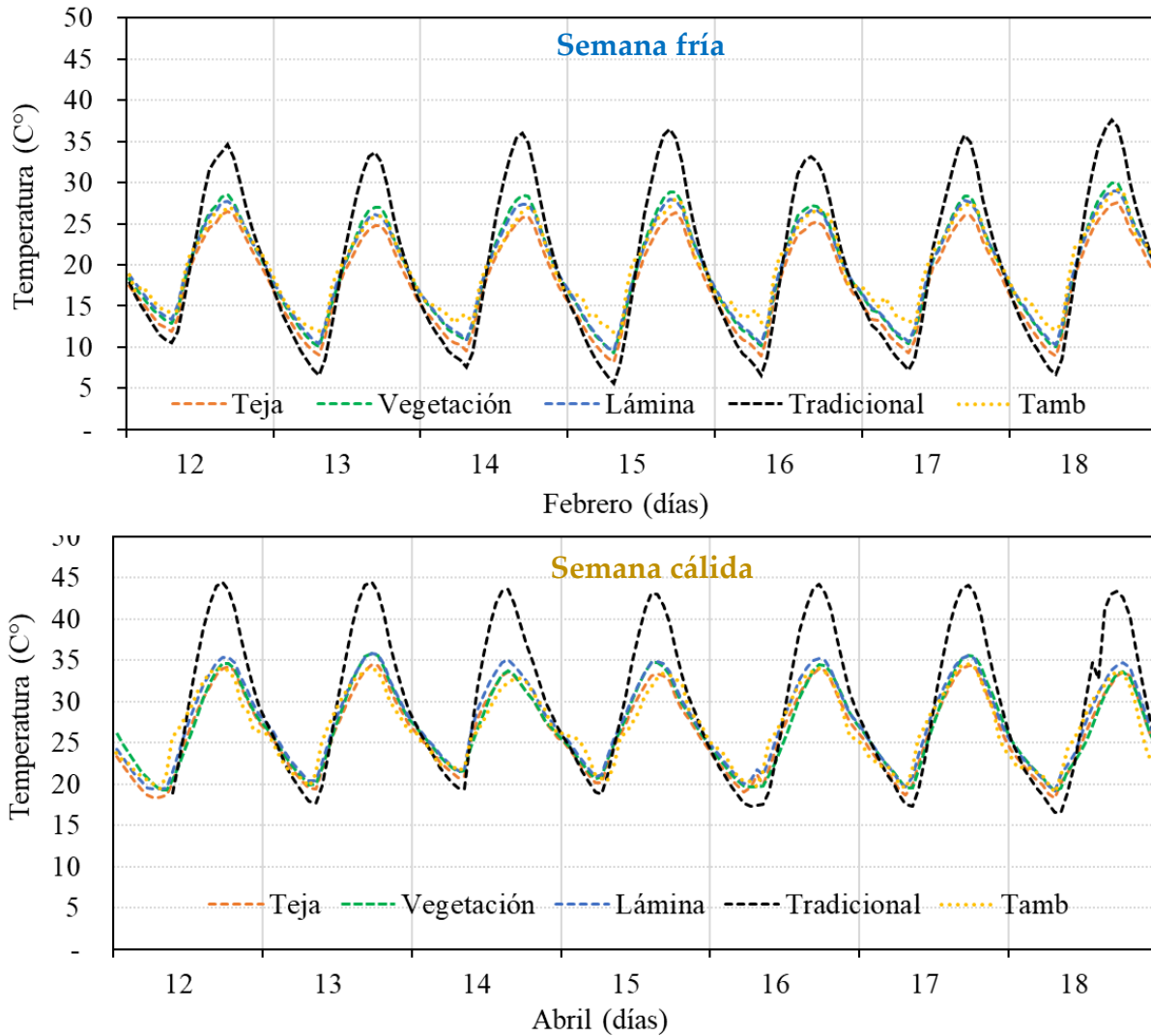


Figura 3.35 Comportamiento semanal de la temperatura interna.

Temperatura de la losa con los diferentes techos

La temperatura de las cuatro losas se muestra en la Figura 3.36. Se observa que la losa tradicional presentó la mayor temperatura en los dos periodos, en la semana fría la temperatura alcanzó hasta 40 °C y en la semana cálida llegó hasta los 48.7 °C. La temperatura de las losas empezó a elevarse por las mañanas alrededor de las 9:00 h cuando la radiación solar comienza a incidir en ellas, y se mantuvo en aumento hasta las

18:00 h, que es cuando la radiación solar y la temperatura ambiente disminuyen, en ese horario la temperatura comienza a descender hasta las 9:00 h del día siguiente, y el ciclo comienza de nuevo. En la semana fría la temperatura de la losa puede disminuir al colocar un techo ventilado hasta 16.1, 13.6 y 12.6 °C para un techo con teja, con lámina y vegetación, respectivamente. Mientras que, para la semana cálida la temperatura puede disminuir hasta 18.4, 18.2 y 15.9 °C para un techo con teja, con vegetación y lámina, respectivamente. La temperatura de la losa tradicional oscila de 7.4 a 48.7 °C, y la temperatura de las losas ventiladas de 13.4 a 34.7 °C.

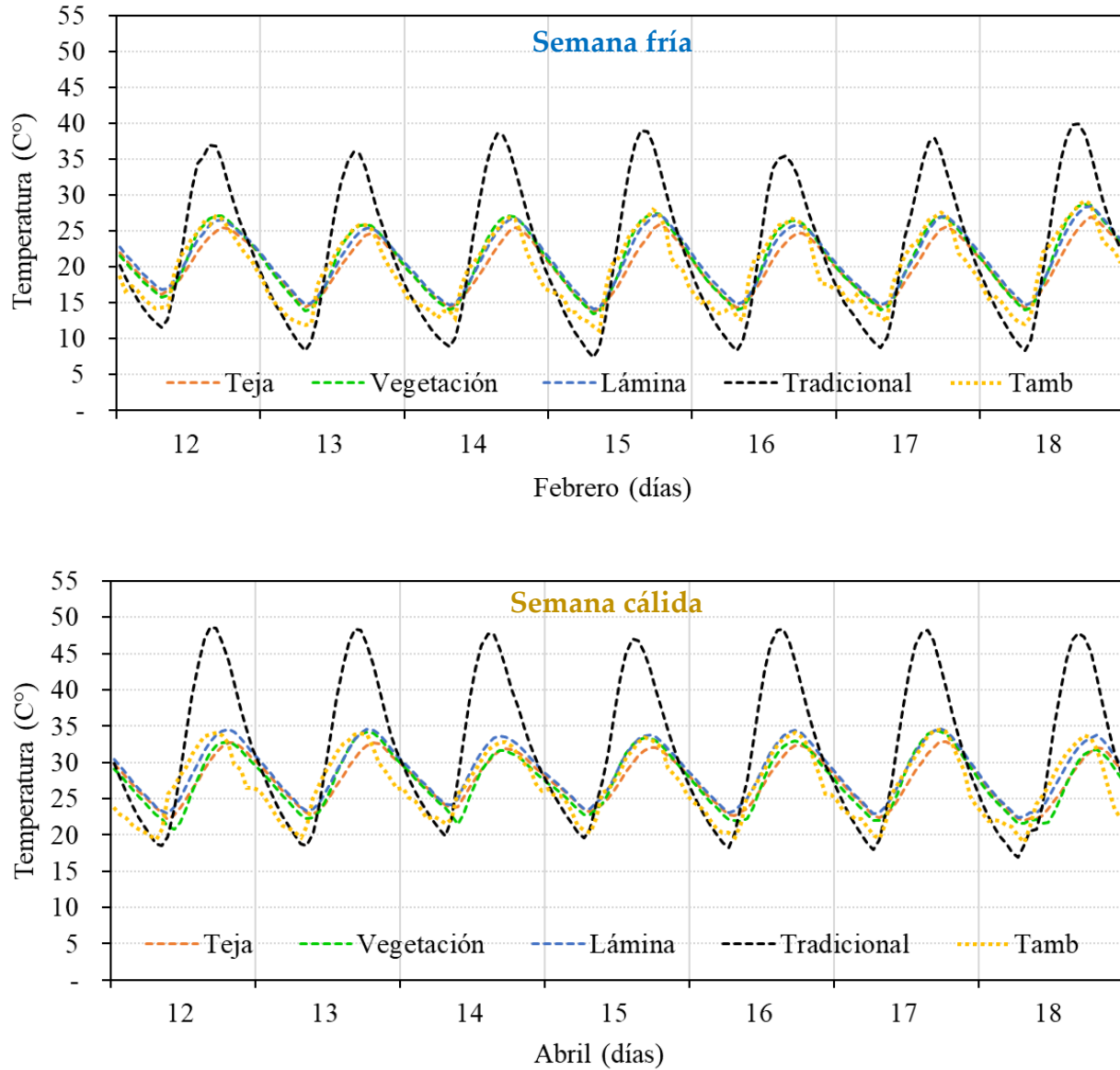


Figura 3.36 Comportamiento semanal de la temperatura de la losa.

Temperatura en las superficies de los techos ventilados

En la Figura 3.37 se muestra la temperatura exterior e inferior del techo secundario o ventilado. Se observa que la temperatura de la superficie exterior siempre es mayor que la temperatura de la superficie inferior en los dos periodos y en todos los techos. En la semana fría la diferencia máxima de temperatura entre las dos superficies fue de 12.7, 6.4

y 3.3 °C para los techos de teja, vegetación y lámina, respectivamente. En la semana cálida la diferencia máxima de temperatura entre las dos superficies fue de 13, 12.3 y 4.2 °C para los techos de teja, vegetación y lámina, respectivamente. La mayor diferencia la presentó el techo ventilado de teja y se debe a los canales de aire que se forman entre las tejas, al espesor y propiedades térmicas de las mismas, y a las dos capas de tejas que se necesitan para formar el techo. La menor diferencia se presentó en el techo de lámina, esto debido al espesor tan pequeño (aproximado 1 mm) que posee. El techo secundario de lámina alcanza hasta 54 °C en las horas de mayor radiación, por el contrario, el techo con vegetación tiene un comportamiento a lo largo de los días más cercano a la temperatura ambiente, incluso por debajo de esta en la semana cálida.

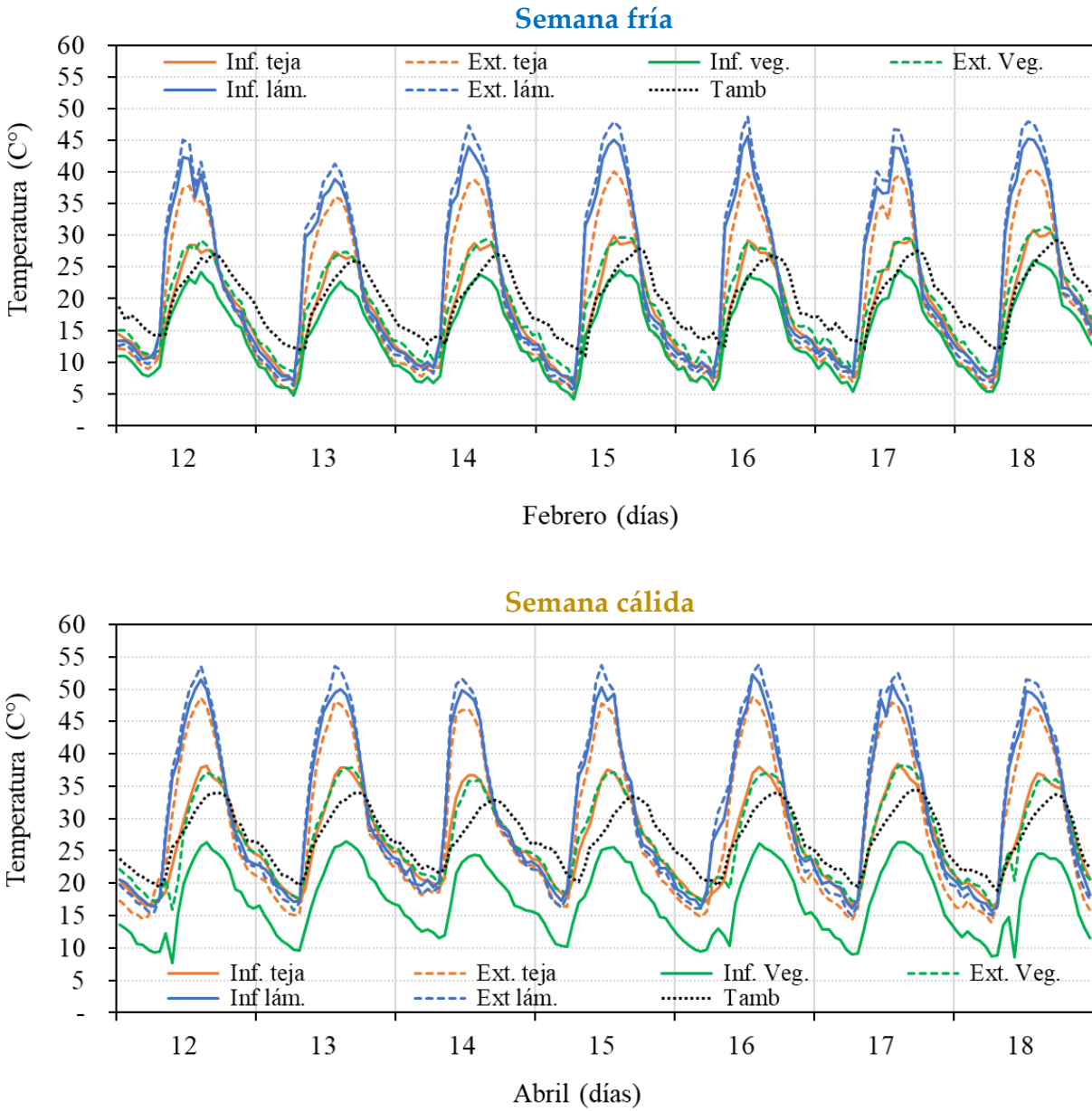


Figura 3.37 Comportamiento semanal de la temperatura en la superficie interior y exterior de los techos ventilados.

Uno de los puntos donde se midió la temperatura fue a 35 cm de altura del techo secundario para conocer el efecto que tiene este elemento sobre el ambiente cercano y se encontró una reducción máxima de 0.3 °C con la vegetación, respecto al techo tradicional. De acuerdo a la literatura este es un punto importante a ser medido, pues una de las

ventajas que tiene la vegetación sobre otros materiales, es que el follaje absorbe la mayor parte de la radiación y la utiliza para la fotosíntesis, al contrario de otros materiales que la absorben y la almacenan. Algunos estudios que midieron la temperatura sobre la vegetación fueron el de Zheng et al. (2021), quienes colocaron un sensor a 60 cm de altura de un techo verde de 500 m² y encontraron que la temperatura de ese punto disminuyó en promedio 0.3 °C cuando se comparó con un techo tradicional. También Mirnezhad et al. (2017) midieron la temperatura a 1 m de altura de la vegetación de un área de 9 mil metros cuadrados y encontraron una disminución de hasta 2 °C, respecto a un techo tradicional. En conclusión, el área de la vegetación del módulo de prueba es pequeña para proyectar un mayor efecto sobre el ambiente cercano.

Día más frío de todo el periodo de medición

De todos los días del monitoreo se seleccionó un día que representará el periodo de invierno en la zona de Cuernavaca. El día elegido fue el 15 de febrero y se seleccionó de acuerdo con la temperatura ambiente más baja. En la Figura 3.38a se observa que la temperatura interior es mayor en el módulo con losa tradicional, su punto máximo lo alcanzó a las 17:00 horas con 36.5 °C. La oscilación de temperatura interna que presenta el módulo sin sombreado (tradicional) es de 30.9 °C, este módulo gana y pierde energía con mayor rapidez que los otros módulos de prueba. En los módulos con techo ventilado de lámina y vegetación el comportamiento es muy similar, la temperatura interna varía en promedio 0.3 °C y máximo 1 °C entre estos dos módulos; mientras que el módulo con techo ventilado de teja se mantiene por debajo de la temperatura ambiente a lo largo del día. La oscilación de temperatura para los techos de vegetación, lámina y teja es de 19.6, 18.4 y 18.2 °C, respectivamente. En la Figura 3.38b se observa la temperatura de las losas, la mayor se presentó en la losa tradicional con 39 °C, y se pudo reducir 16.1, 13.6 y 12.6 °C con el techo ventilado de teja, lámina y vegetación, respectivamente. En las horas de

mayor radiación la lámina proporcionó un sombreado uniforme y por ello logró reducir más la temperatura que la vegetación, ya que en la vegetación había huecos por donde pasaba la radiación y llegaba a la losa. Mientras que la teja, además de formar una sombra uniforme tiene canales de aire entre las tejas y eso ayudó a que la temperatura disminuyera aún más. La losa de tradicional alcanza su temperatura máxima a las 15:00 h, mientras que las losas ventiladas a las 18:00 h, lo que indica un retraso en la temperatura máxima de tres horas. En la Figura 3.38c, se encuentran las temperaturas en las superficies externas e internas de los techos ventilados, se aprecia que la superficie exterior al estar en contacto directo con la radiación presentó las temperaturas más altas. La diferencia máxima entre las dos superficies fue de 12.7, 6.1 y 2.9 °C en el techo de teja, vegetación y lámina, respectivamente. Esto se debe al espesor que hay entre las dos superficies y al material del techo. la superficie exterior de lámina alcanzó 47.9 °C, mientras que la vegetación presentó 29.7 °C, esto en consecuencia de las propiedades de la vegetación, que tiene la característica de metabolizar la radiación y enfriar el ambiente cercano por medio de la evapotranspiración. Finalmente, en la Figura 3.38d se presenta la temperatura en el canal de aire que se forma con el techo primario y secundario. Se aprecia que la temperatura en los tres canales es muy similar, su máxima variación fue de 1.5 °C a las 18:00 h. Respecto a la temperatura ambiente, el aire del canal estuvo en promedio 3.5 °C arriba de la temperatura ambiente en las horas de radiación (7:00-17:00 h), mientras que en la noche se mantuvo, al contrario.

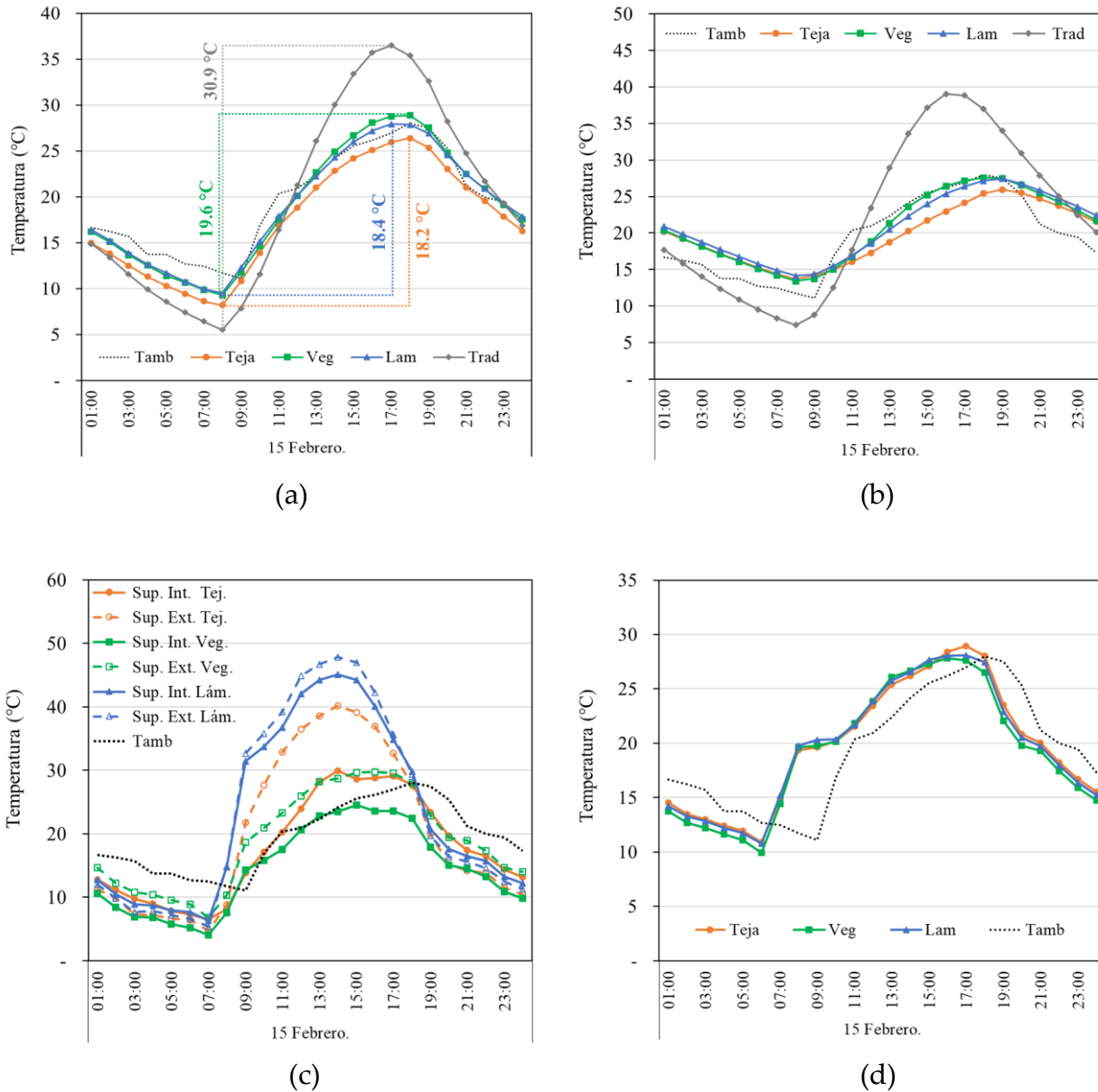


Figura 3.38 Temperatura del día más frío: (a) interna, (b) de la losa, (c) de las superficies del techo ventilado, (d) del canal de aire.

Día más cálido de todo el periodo de medición

El día más cálido del periodo de mediciones fue el 13 abril, también se seleccionó de acuerdo a la temperatura ambiente más alta. En este día se observa que el módulo sin techo ventilado presentó la mayor temperatura interna de todos. Sin embargo, la

temperatura en los módulos ventilados es menor 3.8 °C en promedio, y pueden reducir hasta 10.4, 8.8 y 8.7 °C con el techo de teja, lámina y vegetación. La oscilación de temperatura interna máxima la presentó el módulo tradicional con 26.7 °C, el resto de los módulos con techo ventilado tuvieron una oscilación de temperatura similar dentro de los 15 °C. Los datos muestran que el mayor amortiguamiento térmico se presentó en el módulo con techo ventilado de teja, mientras que el menor amortiguamiento se tuvo en el módulo con losa desnuda, lo que indica que la configuración de las tejas presentó mayor resistencia al flujo de calor, pues redujo 22.5% la temperatura interna en comparación al módulo tradicional, mientras que el módulo con vegetación y lámina redujeron 19.4% (Figura 3.39). En la Figura 3.39b se muestra la temperatura al interior de las cuatro losas. Se observa que la losa tradicional alcanzó 48.3 °C a las 17:00 h, mientras que las losas ventiladas de lámina, vegetación y teja alcanzaron hasta 34.6, 34.2 y 32.7 °C a las 19:00 h, respectivamente; lo que indica un retraso en la temperatura máxima de dos horas y una reducción promedio de 8.6 °C. De las tres losas ventiladas, la de teja se mantuvo por debajo en las horas de radiación, mientras que en la noche la de vegetación se mantuvo por debajo. Esto indica que, durante el día las tejas logran bloquear la radiación mayormente que la vegetación. Pero en la noche, la vegetación transpira con un índice mayor que en el día, esto ayuda a disminuir la temperatura del ambiente cercano, además de que por los huecos que se forman entre las hojas el aire caliente del canal se puede desplazar hacia el exterior con mayor facilidad. En la Figura 3.39c se muestran las temperaturas de las superficies del techo ventilado. La lámina al tener mayor conductividad se calentó más y presentó hasta 53.6 °C en la superficie exterior. Las tejas a pesar de ser color terracota se calentaron menos, la superficie exterior alcanzó hasta 48 °C. La vegetación alcanzó 37.8 °C, el punto en el que se midió la temperatura estaba muy cercano a las hojas de la superficie exterior. Finalmente, la Figura 3.39d muestra la temperatura en el canal de aire. El comportamiento de los tres techos es muy similar, solo hay 0.3 °C de variación entre ellos. Respecto a la temperatura ambiente, la temperatura

de los canales estuvieron en promedio $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ arriba, esto durante el día, ya que en la noche la temperatura fue ligeramente menor.

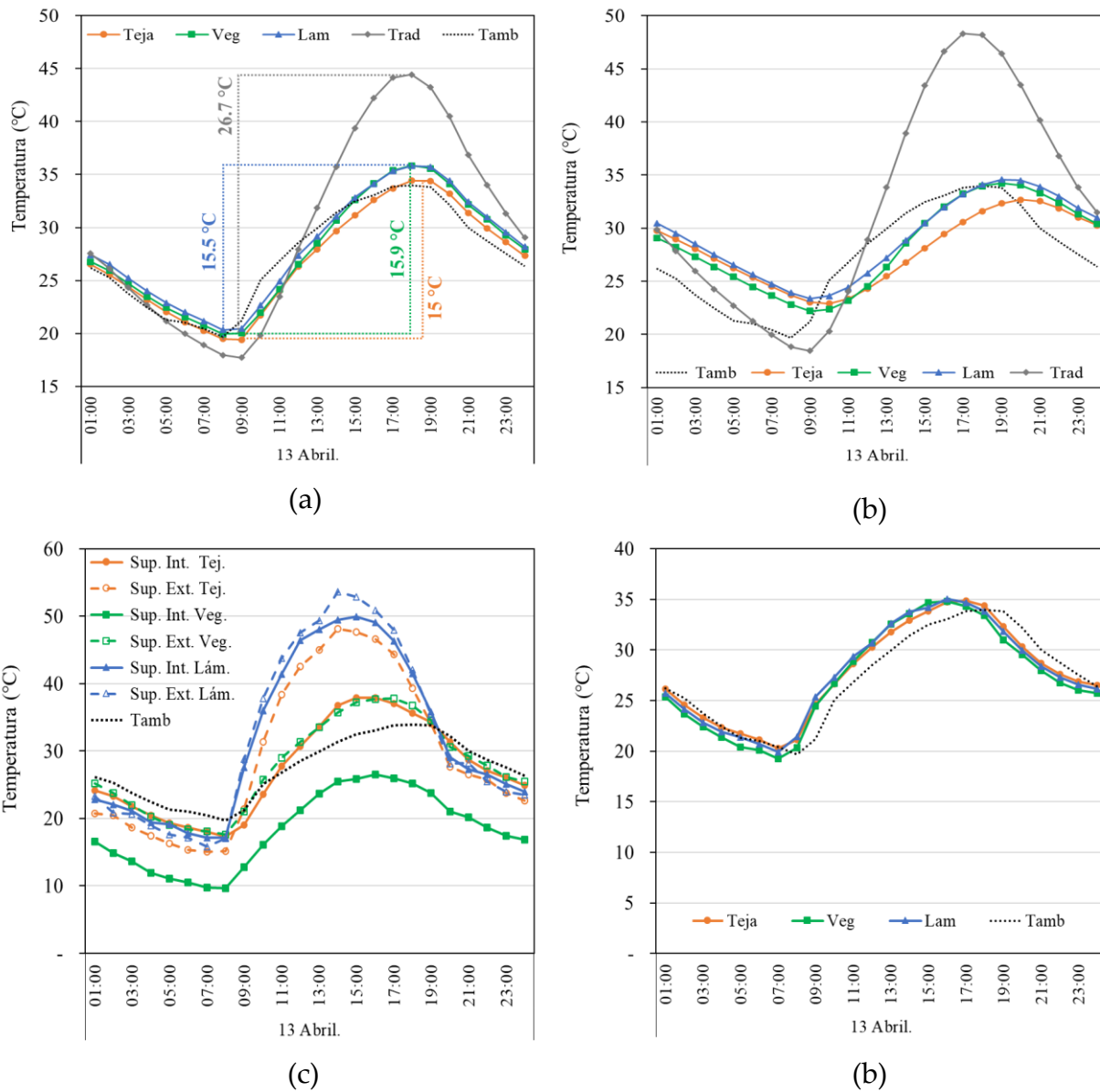


Figura 3.39 Temperatura del día más cálido: (a) interna, (b) de la losa, (c) de las superficies del techo ventilado, (d) del canal de aire.

3.2.5 Conclusiones de la etapa II

- El módulo con techo desnudo (losa común) presentó la temperatura más alta en el interior del módulo y en la losa en todo el periodo de análisis.
- El techo ventilado que redujo mayormente la temperatura interna respecto al módulo tradicional fue el de teja, con una máxima de 10.9 °C y en promedio 3.2 °C.
- La diferencia de temperatura entre la superficie exterior e inferior de los techos ventilados fue mayor en el techo de teja, seguido por el de vegetación y por último el de lámina.
- La vegetación no tuvo un crecimiento denso y uniforme a lo largo de los meses, está propensa a enfermedades y los fuertes vientos pueden mover las ramas de su sitio provocando huecos entre las hojas que dejan pasar directamente la radiación solar al techo.

3.3 Etapa III. Validación/calibración del modelo energético/físico en el software

Las herramientas de Simulación de Energía en Edificios o en inglés Building Energy Simulation (BES) son una herramienta rápida y económica para predecir el comportamiento térmico de las edificaciones durante sus diferentes fases, desde el prediseño, terminación y operación. Los BES se basan en leyes termodinámicas para predecir el comportamiento de un sistema dadas sus propiedades y condiciones externas. La mayoría de los softwares de simulación consideran cada zona del edificio como un volumen homogéneo caracterizado por valores de temperatura, presión o humedad. Cada zona representa un nodo de la malla, en el que se resuelven las ecuaciones de transferencia de calor en cada paso de tiempo.

El proceso de calibración del modelo energético/físico tiene como objetivo reducir la diferencia entre los datos medidos y los datos simulados. Consiste en ajustar los diferentes parámetros de entrada desconocidos dentro de un rango definido para hacer coincidir los valores simulados con los medidos. Los objetivos típicos de la calibración del modelo energético del edificio incluyen la capacidad de igualar el consumo de energía simulado, la temperatura del aire interior, la temperatura de las superficies y las condiciones de funcionamiento del equipo HVAC (Guyot et al., 2020).

Generalmente los modelos BES se pueden calibrar de forma automatizada o manual. En el enfoque automatizado se usan herramientas matemáticas o estadísticas como las redes neuronales, algoritmos genéticos y procesos de regresión. En el enfoque manual el usuario hace de manera “manual” e iterativa la búsqueda de las variables desconocidas a base de prueba y error y se basa en la experiencia. El objetivo de ambos métodos es la obtención de parámetros que hacen que el modelo virtual sea lo más parecido a la realidad, teniendo como referencia los datos conocidos (medidos). Sin embargo, los valores de los parámetros encontrados pueden hacer coincidir los resultados simulados con los datos medidos, pero no necesariamente pueden coincidir con los valores reales de los materiales. Los parámetros que se pueden variar son las propiedades térmicas de los materiales de la envolvente (paredes, techo, pisos, ventanas, infiltración de aire); la geometría del edificio (pequeñas simplificaciones en marcos de ventanas, detalles artísticos en puertas o paredes) y el sistema de aire acondicionado (capacidad, eficiencia, temperaturas de confort).

En otras palabras, la calibración del modelo energético/físico del experimento consiste en representar e intentar igualar el problema real dentro del software. Para ello se construyó la geometría de los módulos experimentales dentro de DesignBuilder, de acuerdo a sus características reales. Una vez construida la geometría se agregaron todos los datos

conocidos: propiedades termofísicas de los materiales y condiciones ambientales. A los parámetros desconocidos se les asigna un valor dentro del intervalo aceptable para ese parámetro, y se realiza la simulación. Una vez hecha la simulación se comparan los datos simulados con los datos medidos experimentalmente. Si la diferencia entre estos valores es muy grande de acuerdo a parámetros estadísticos de error, se vuelve a simular cambiando las propiedades desconocidas de una manera sistemática e iterativa, hasta que la diferencia entre los dos tipos de datos (simulados y experimentales) sea la menor posible. Cuando la diferencia entre los dos tipos de datos está dentro del intervalo aceptable (de acuerdo a los parámetros de error), los valores propuestos de los parámetros desconocidos se toman como correctos y se pueden usar para la simulación de otra edificación con la seguridad de que los resultados serán correctos. El diagrama de flujo que ejemplifica el proceso se muestra en la Figura 3.40.

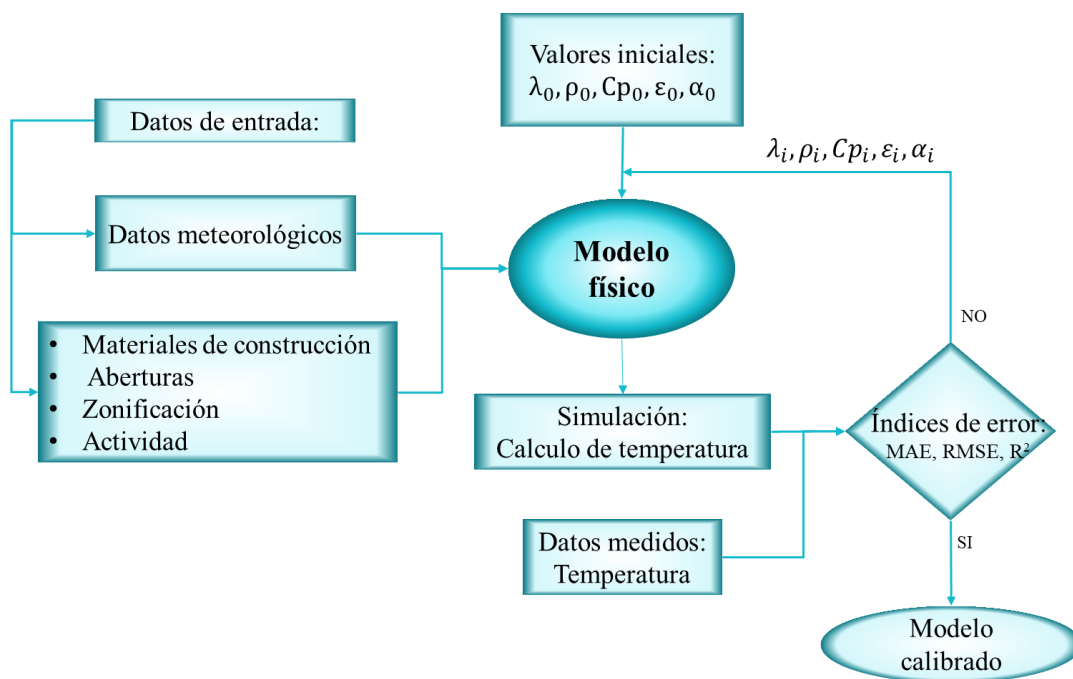


Figura 3.40 Diagrama de flujo de la metodología de calibración.

Creación del techo ventilado en DesignBuilder

DesignBuilder no cuenta con un techo ventilado como tal, en la versión del software que se usó (Versión 4.5). Por lo que se construyó agregando un segundo piso o nivel al módulo de prueba con la altura del canal de aire requerido, en este caso de 15 cm. En cada una de las paredes se realizó un hueco del tamaño de toda la pared para que quedará solo el techo y cuatro columnas, una en cada esquina. Posteriormente, se asignó el material de construcción al techo secundario, que fue lámina de acero y teja de barro; estos dos materiales están incluidos en la biblioteca de materiales del software. Sin embargo, el software no cuenta con un material denominado “vegetación” que tenga las características de la vegetación y que se pueda usar para formar el techo ventilado con vegetación.

Creación del techo ventilado verde

DesignBuilder cuenta con la opción de agregar un techo verde a la edificación, este techo verde es el modelo básico, que integra la vegetación y el sustrato directamente sobre todo el techo de la edificación. Sin embargo, uno de los objetivos principales de esta tesis fue la simulación de un techo ventilado combinado con vegetación, y esta configuración de techo no se encuentra disponible en el software, por lo que se tuvo que crear como un material nuevo con propiedades aparentes. Para formar el módulo se siguió la misma metodología usada en la creación de los techos ventilados de lámina y teja. Y para asignar el material al techo secundario se siguió el enfoque propuesto por Šuklje et al. (2019), que menciona que los sistemas vegetativos se pueden considerar como una capa homogénea con propiedades termofísicas aparentes. El método se formula como un problema de conducción de calor en una capa homogénea de la envolvente que determina las propiedades termofísicas y radiativas. Así, se crea un nuevo material y como algunas propiedades no se conocen, se asumen y se usan para la simulación del edificio. Una vez

hecha la simulación, las temperaturas simuladas se comparan con las temperaturas medidas del sistema experimental, y se busca la menor diferencia entre las dos temperaturas.

Para encontrar las propiedades termofísicas de la capa vegetal se realizó la metodología ejemplificada en la Figura 3.40. Se varió la conductividad térmica, calor específico, densidad, absortancia y emitancia, para el material nuevo creado (vegetación) y para la losa de concreto de los módulos. Ya que cuando se elaboró la mezcla para la losa no se siguió una metodología para su realización ni se usaron cantidades específicas de cemento, arena, grava o agua, si no que se hicieron a base de la experiencia. El agregar más o menos cantidad de algún elemento hace que cambien sus propiedades térmicas, es por ello que se variaron dentro de un intervalo de valores; estos valores se tomaron de la biblioteca de materiales de DesignBuilder, donde hay un extenso catálogo de concretos. Y el intervalo de valores para la vegetación se tomaron de varios estudios, donde se analizaron las propiedades térmicas y ópticas de las hojas de diferentes plantas (Šuklje et al. 2019, Carbajal-Avila et al. 2016, Paz Pellat et al. 2013, Cabello-Pasini et al. 2011). En la Tabla 3.3 se muestran los valores mínimos y máximos de los parámetros libres o desconocidos, y los datos seleccionados después de las simulaciones de calibración.

Tabla 3.3 Parámetros libres para la calibración.

Componente	Parámetro	Mínimo	Máximo	Seleccionado
Losa	Conductividad térmica (W/mK)	0.38	2.3	1.7
	Calor específico (J/kgK)	840	1000	850
	Densidad (kg/m ³)	1200	2400	1500
	Absortancia	0	1	0.8
	Emisividad	0	1	0.6
Vegetación	Conductividad térmica (W/mK)	0	5	0.72
	Calor específico (J/kgK)	0	10000	840
	Densidad (kg/m ³)	1	1000	400
	Absortancia	0.1	1	0.5
	Emisividad	0.1	1	0.9

Los componentes de los módulos experimentales y sus propiedades termofísicas usadas en la simulación se presentan en la Tabla 3.4, y en la Figura 3.41 los módulos de prueba con techo ventilado de lámina y vegetación construido dentro de DesignBuilder.

Tabla 3.4 Componentes de construcción de los módulos experimentales.

Componente	Espesor (cm)	λ (W/mK)	Cp (J/kgK)	ρ (kg/m ³)
Aislante térmico	2.4	0.0288	1470	40.27
Madera OSB	2.4	0.13	1880	650
Lámina de acero	0.2	50	450	7800
Teja de barro	7	1	800	1500



Figura 3.41 Módulos virtuales con techo ventilado de lámina y vegetación.

Consideraciones del techo ventilado-verde

La vegetación es un sistema vivo que es afectado por las condiciones ambientales y del cual no se tiene completo control de su salud, crecimiento y cantidad de hojas. En la vida real un sistema vegetal pierde hojas, requiere riego y fertilizantes, puede ser atacado por plagas y su crecimiento se ve afectado por la estación del año. Sin embargo, para la simulación se considera un sistema ideal, donde la vegetación presenta el mismo nivel de crecimiento y proporciona el mismo nivel de sombreado a lo largo de la simulación.

3.3.1 Cálculo del error en la validación

Al realizar simulaciones los resultados proporcionados por el software no tendrían valor si el caso base no estuviera correctamente calibrado, es decir, el modelo virtual del edificio bajo análisis debe representar fielmente el comportamiento térmico y energético de ese edificio. Para lograr este objetivo, fue necesario comparar los datos simulados con los datos medidos. En esta tarea, se consideraron todos los parámetros de entrada que se

pueden ajustar para obtener los resultados de referencia. En términos de temperatura interior, el rendimiento operativo de CIBSE¹: modelado y calibración del rendimiento de edificios para la evaluación de la energía en uso, utiliza el error medio absoluto (MAE²) y el error cuadrático medio (RMSE³) para comparar los resultados simulados con los valores medidos. Se estableció un límite aceptable de MAE de temperatura interior de menor o igual a 2 °C. Mientras que la norma alemana VDI-6020: 2002 proporciona un valor máximo para el RMSE de 1.5 °C. Ambos índices miden la distancia absoluta del vector al comparar los datos simulados con los medidos, evitando errores de cancelación (Pachano, 2021).

El MAE es el promedio de los errores absolutos entre los valores simulados y medidos:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |m_i - s_i|}{n} \quad (3.1)$$

El RMSE, también conocido como desviación estándar de las diferencias entre los valores medidos y simulados, mide la raíz del error cuadrado entre el valor simulado y el medido:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - s_i)^2}{n}} \quad (3.2)$$

Las fórmulas anteriores miden la distancia entre el valor simulado y el medido. Aunque estos índices de error de sesgo son importantes, también es necesario evaluar cómo se comporta el modelo de simulación de un paso de tiempo a otro en comparación con las mediciones reales. La calidad de esta relación lineal entre los datos simulados y

¹ Chartered Institution of Building Services Engineers

² Mean Absolute Error

³ Root Mean Square Error

observados se obtiene con el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson (R^2), recomendado por las normas ASHRAE y IPMVP⁴ como medida de calidad (Pachano, 2021).

R^2 mide la relación lineal entre las pendientes de una curva simulada y una medida, en otras palabras, qué tan similar es la curva simulada con la medida.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m}) \cdot (s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}} \right)^2 \quad (3.3)$$

Donde \bar{m} es la media de los valores medidos, \bar{s} es la media de los valores simulados, m_i es el valor medido, s_i es el valor simulado y n es el numero de puntos de datos, en la Tabla 3.5 se resumen los índices de error (Pachano, 2021).

Tabla 3.5 Valores límite de índice de error horario para modelos simulados.

Índice horario	CIBSE	VDI-6020
MAE (°C)	≤ 2.0	–
RMSE (°C)	–	≤ 1.5
R^2 (%)	≥ 75	≥ 75

3.3.2 Resultados de la validación

En la validación se simuló todo el periodo de mediciones experimentales (5 enero al 31 mayo del 2021), pero solo se presentan los días del 01-07 de marzo, esto con la finalidad de una mejor apreciación en las gráficas, ya que con una presentación de más días no se logra visualizar el comportamiento térmico de los módulos de prueba. En los siete días de datos ambientales no se presentaron lluvias, siendo el comportamiento ambiental

⁴ International Performance Measurement and Verification Protocol

bastante uniforme. La temperatura ambiente promedio durante este periodo fue de 25 °C con un máximo de 33.4 °C y un mínimo 17.1 °C, la radiación solar máxima fue de 982 W/m², la humedad relativa promedio fue de 31.9% y la velocidad del viento promedio es de 1.1 m/s alcanzando una máxima el día 06 de marzo. En la Figura 3.42 se observan las variables climáticas utilizadas y en la Tabla 3.6 las mínimos y máximos de cada variable.

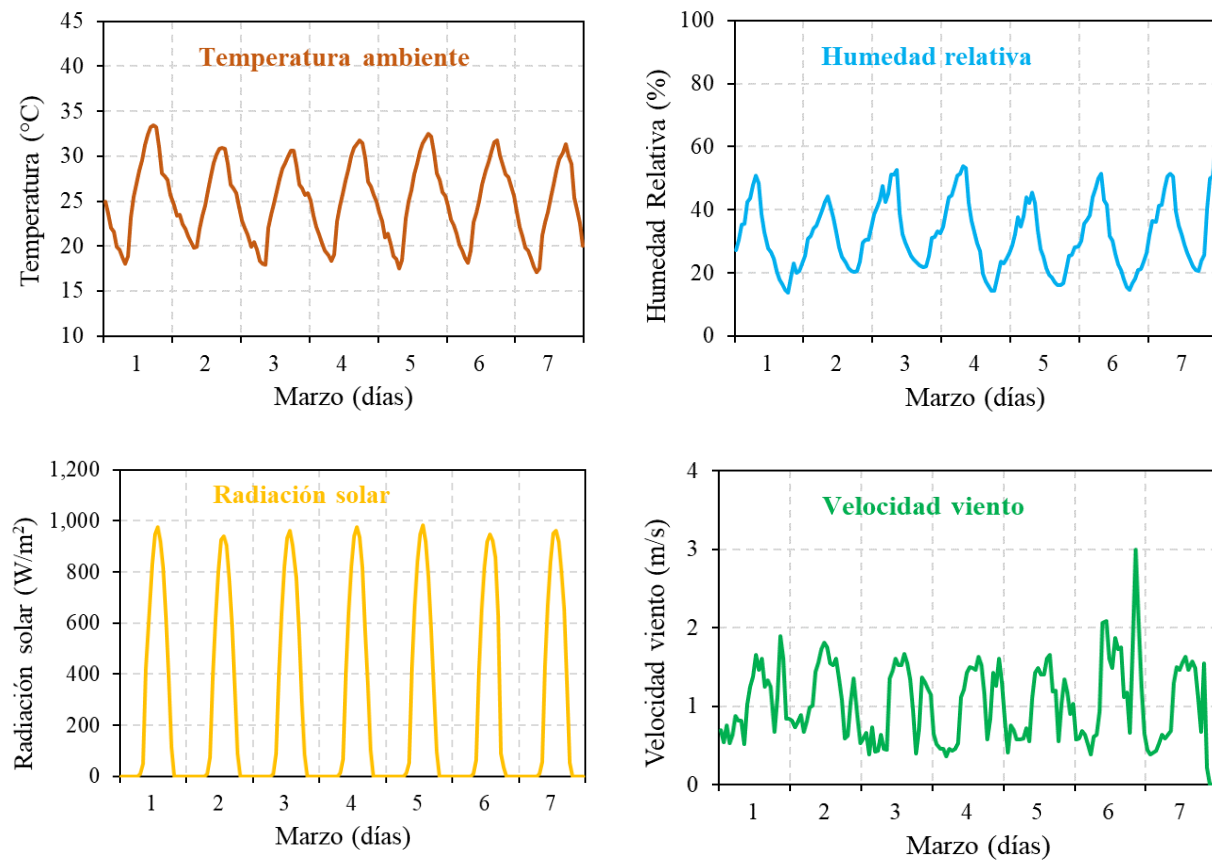


Figura 3.42 Variables climáticas para la validación.

Tabla 3.6 Mínimos y máximos de las variables climáticas.

VARIABLES CLIMÁTICAS	MÍNIMO	MÁXIMO	PROMEDIO
Temperatura ambiente (°C)	17.1	33.4	25.0
Radiación solar (W/m ²)	0	982	274.0
Humedad relativa (%)	13.7	60.0	31.9
Velocidad del viento (m/s)	0.2	3.0	1.1

Techo tradicional

En la Figura 3.43 se muestra la temperatura de la superficie exterior de la losa y la temperatura interior del módulo, la “m” indica que los valores son medidos y la “s” que los valores son simulados. La temperatura máxima interior del módulo obtenida en el sitio de medición fue de 43 °C y la simulada de 43.5 °C. Por otro lado, la temperatura de la superficie exterior de la losa presentó una diferencia entre los datos medidos y simulados de 1.4 °C, que corresponde al error MAE. Ambos puntos comparados están sobre el 97% de precisión de acuerdo a R². En la Tabla 3.7 se pueden apreciar los valores de temperatura mínimos y máximos, así como los índices de error entre los valores medidos y simulados.

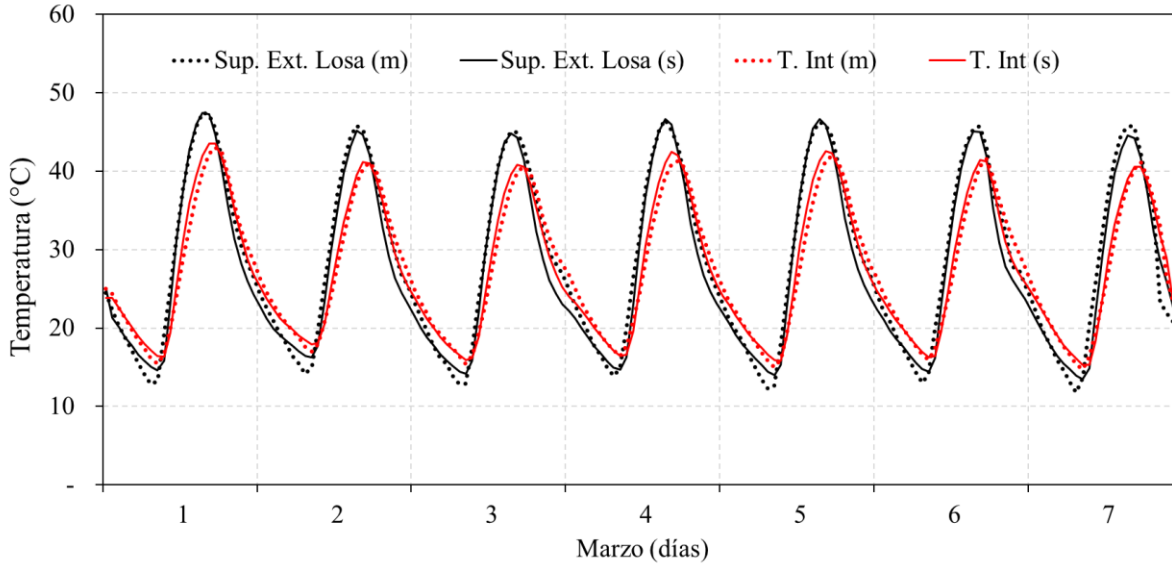


Figura 3.43 Temperatura del techo tradicional, datos medidos y simulados.

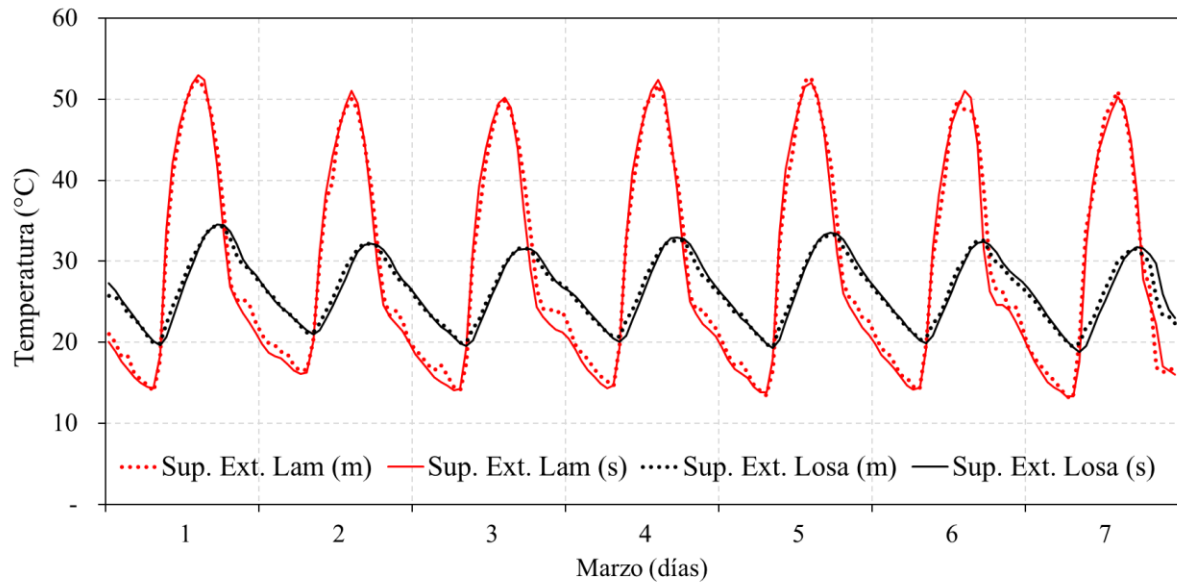
Tabla 3.7 Índices de error para el techo ventilado con tradicional.

Variable	Datos	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ² (%)
Sup. Ext. Losa	Medidos	11.8	47.5	28.3	1.4	1.8	97.6
	Simulados	13.5	47.4	27.4			
Int. Modulo	Medidos	14.7	43.0	27.4	1.0	1.3	97.6
	Simulados	15.3	43.5	27.4			

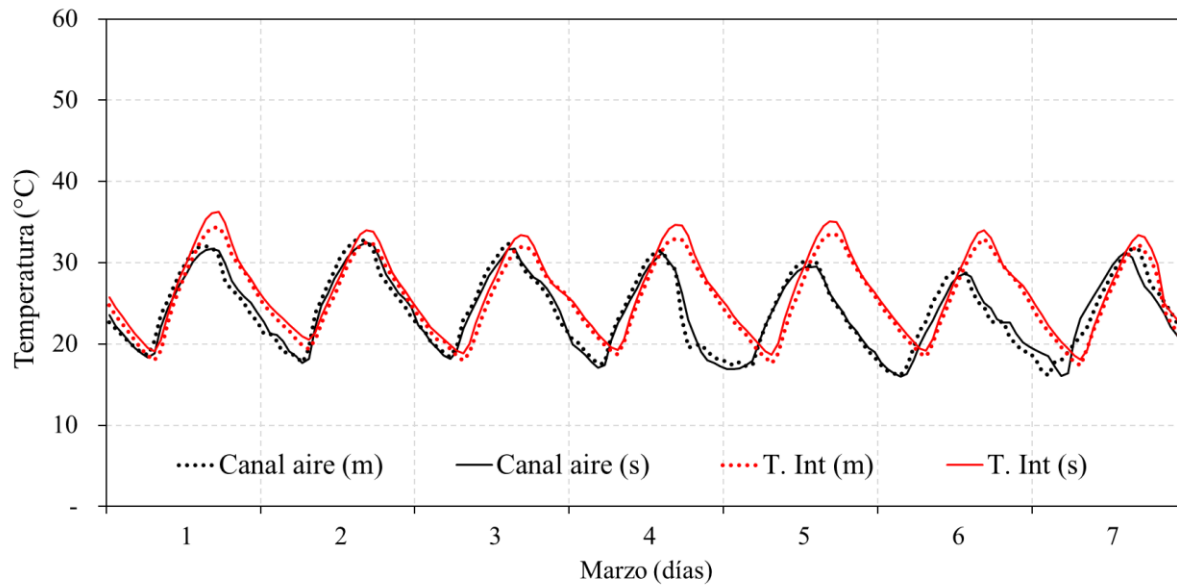
Techo ventilado con lámina galvanizada

En los módulos con techo ventilado se midió además de la temperatura interior y de la superficie de la losa, la temperatura del canal de aire y la temperatura de la superficie exterior del techo secundario (ventilado). Estos cuatro puntos fueron comparados y están representados en la Figura 3.44. Se puede observar que la temperatura de la superficie de la lámina alcanza una máxima de 52.7 °C, mientras que el máximo simulado es de 53 °C, en este punto se tiene una concordancia entre los valores medidos y simulados del 98.7%. El punto mejor ajustado fue la superficie de la losa, con un error MAE de 0.6 °C (Figura

3.44a). Referente a la temperatura interior del módulo y al canal de aire (Figura 3.44b), se presentó un error MAE de 0.9 °C en las horas de mayor temperatura (15:00 a 18:00 h) en ambos puntos comparados. Los detalles de las temperaturas mínimas y máximas se encuentran en la Tabla 3.8.



(a)



(b)

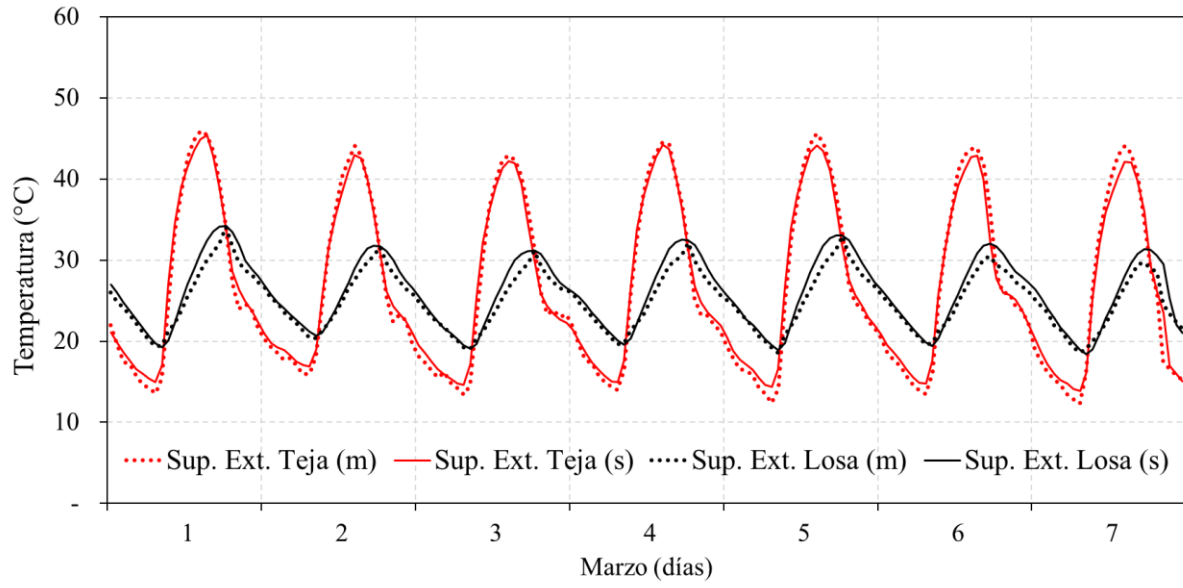
Figura 3.44 Temperatura del techo ventilado con lámina: (a) Superficie exterior de la lámina y de la losa, (b) interior del módulo y canal de aire.

Tabla 3.8 Índices de error para el techo ventilado con lámina.

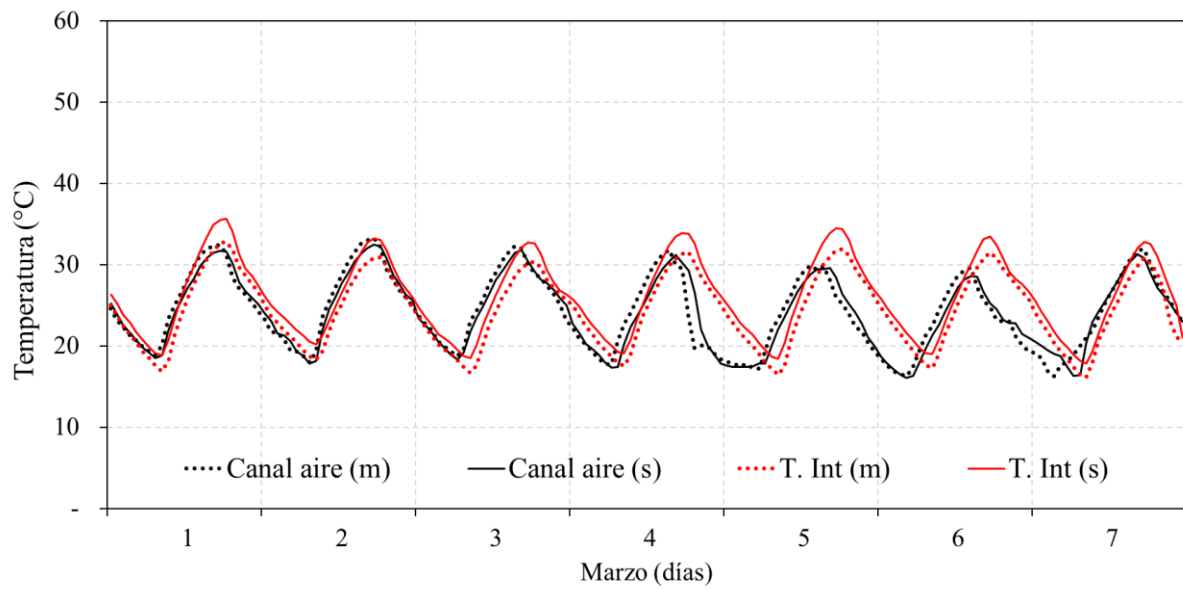
Variable	Datos	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ² (%)
Sup. Ext. Lámina	Medidos	13.1	52.7	29.2	1.2	1.6	98.7
	Simulados	13.3	53.0	28.8			
Canal de aire	Medidos	16.1	32.9	24.1	0.9	1.1	94.5
	Simulados	16.0	32.5	24.0			
Sup. Ext. Losa	Medidos	19.4	34.4	26.4	0.6	0.8	96.6
	Simulados	18.8	34.5	26.4			
Int. Modulo	Medidos	25.6	25.6	25.6	0.9	1.0	99.4
	Simulados	26.5	26.5	26.5			

Techo ventilado con teja

El comportamiento de este techo es similar a los anteriores descritos, las diferentes superficies comienzan a elevar su temperatura alrededor de las 08:00 h. En el módulo con teja, la superficie exterior que está en contacto con el ambiente presentó la temperatura más alta de 14:00-15:00 h, alcanzando 46 °C, pues la cubierta ventilada es quien recibe la mayor parte de radiación. La temperatura máxima de las otras superficies medidas se alcanzó a las 17:00 h, después de este horario la temperatura comenzó a descender hasta que vuelve a incrementarse al día siguiente alrededor de las 08:00 h de la mañana. En la comparación de la superficie externa de la teja se encontró una diferencia máxima de 2.8 °C el día 07 a las 9:00 h y un error MAE de 0.9 °C (Figura 3.45a). Otro de los puntos validados fue la temperatura en el canal de aire, en la comparación se encontró una diferencia promedio de 0.1 °C y un error RMSE de 1.3 °C. Dentro del módulo la temperatura interna no superó los 36 °C y hay 2.8 °C de diferencia máxima entre los datos medidos y simulados (Figura 3.45b). Los cuatro puntos comparados presentan una precisión arriba del 92%, se puede apreciar con más detalle en la Tabla 3.9.



(a)



(b)

Figura 3.45 Temperatura del techo ventilado con teja: (a) Superficie exterior de la teja y de la losa, (b) interior del módulo y canal de aire.

Tabla 3.9 Índices de error para el techo ventilado con teja.

Variable	Datos	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ² (%)
Sup. Ext. Teja	Medidos	12.3	45.9	26.6	0.9	1.2	99.2
	Simulados	13.8	45.4	26.8			
Canal de aire	Medidos	16.2	33.3	24.2	1.0	1.3	92.1
	Simulados	16.1	32.5	24.1			
Sup. Ext. Losa	Medidos	18.6	34.1	25.0	1.0	1.2	97.6
	Simulados	18.4	34.2	25.9			
Int. Modulo	Medidos	16.1	32.8	24.4	1.7	1.8	98.5
	Simulados	17.8	35.6	26.1			

Techo ventilado con vegetación

Para la validación del módulo con techo ventilado-verde, se consideró la vegetación como una capa homogénea con propiedades aparentes y constantes para todo el periodo. En la Figura 3.46a se muestra el comportamiento de la temperatura en la vegetación y en la superficie externa de la losa, tanto valores medidos como simulados. Estos puntos tienen un comportamiento térmico en el intervalo de 14.8 a 36.3 °C, de todos los módulos de prueba, el módulo con la cubierta vegetal presenta un comportamiento más cercano a la temperatura ambiente. La temperatura más alta se presentó en la vegetación con un máximo de 36.3 °C con datos medidos y 36.4 °C con datos simulados, alcanzando un error RMSE de 1.4 °C. Otro parámetro que se comparó fue la temperatura del aire interior del módulo y del canal de aire (Figura 3.46b); en el interior del módulo se tuvo una precisión del 98.4 % calculada con la R². Y en el canal de aire un error de 0.8 °C con el indicador MAE, todo esto al comparar los datos medidos con los simulados. En la Tabla 3.10 se presentan los errores de la validación para cada punto medido.

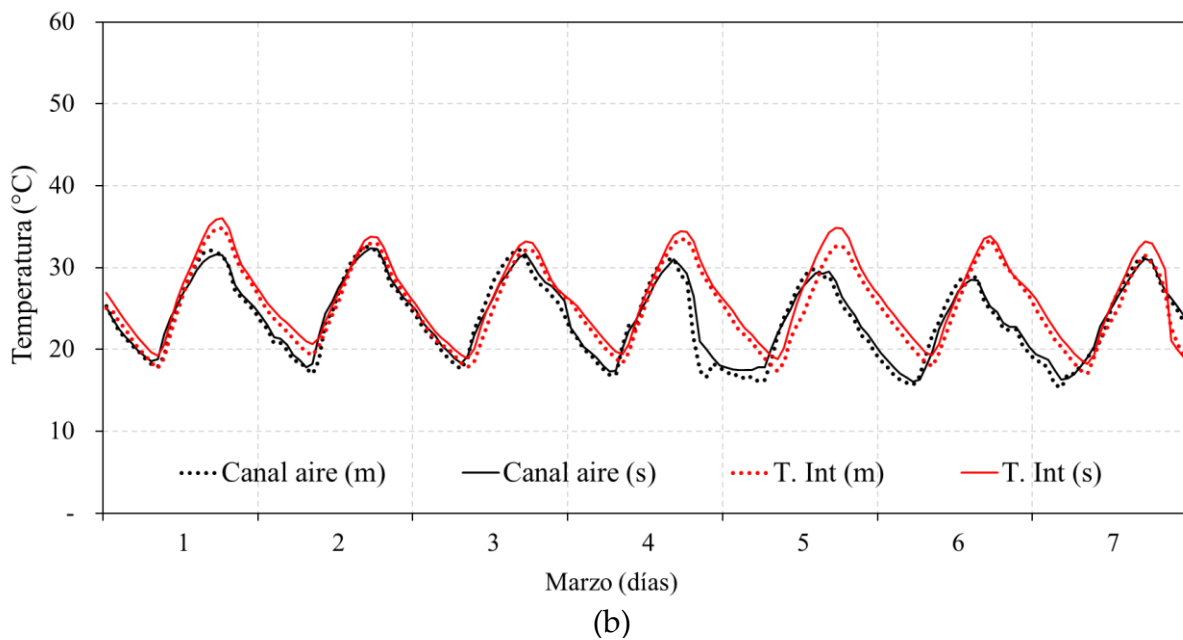
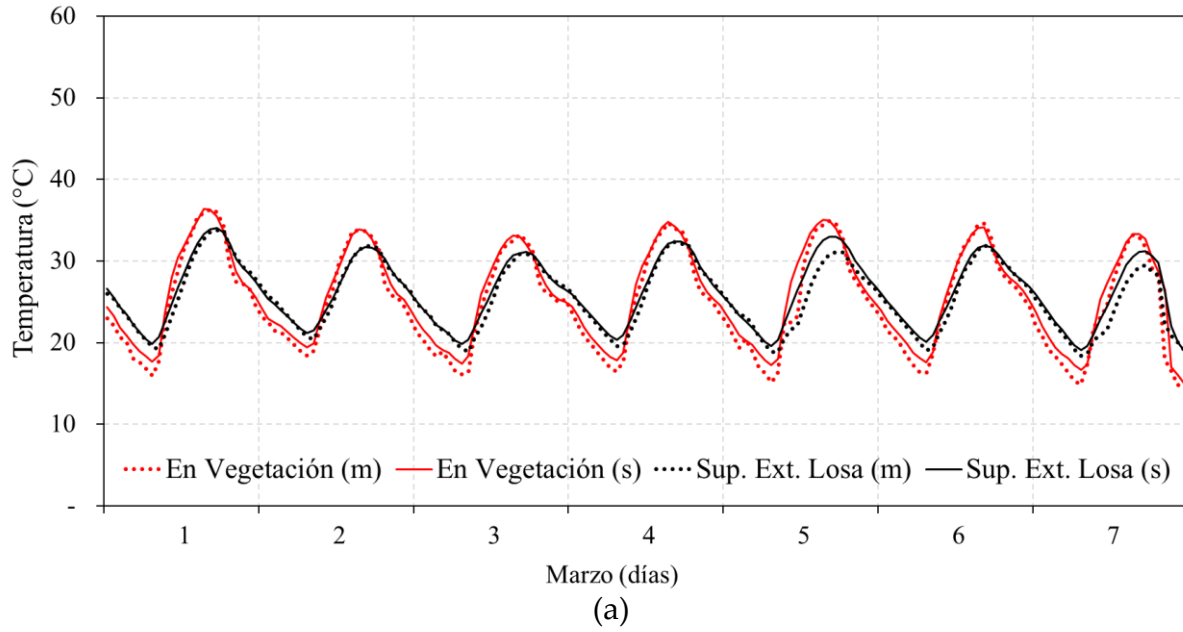


Figura 3.46 Temperatura del techo ventilado con vegetación: (a) Superficie exterior de la vegetación y de la losa, (b) interior del módulo y canal de aire.

Tabla 3.10 Índices de error para el techo ventilado con vegetación.

Variable	Datos	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Promedio (°C)	MAE (°C)	RMSE (°C)	R ² (%)
En vegetación	Medidos	14.8	36.3	24.9	1.0	1.4	97.3
	Simulados	15.0	36.4	25.8			
Canal de aire	Medidos	15.3	32.5	23.7	0.8	1.0	96.4
	Simulados	16.1	32.3	23.9			
Sup. Ext. Losa	Medidos	18.4	33.8	25.5	0.7	1.1	95.5
	Simulados	19.0	34.0	26.2			
Int. Modulo	Medidos	17.0	34.8	25.3	1.1	1.3	98.4
	Simulados	18.2	36.0	26.4			

3.3.3 Conclusiones de la etapa III

- El error máximo MAE calculado fue de 1.7 °C y el aceptado es de 2 °C.
- En todos los puntos validados el error R² es superior al 75% aceptable.
- La precisión más alta se encontró en la comparación de la temperatura interior con un 99.4% de precisión entre los datos medidos y simulados con el índice R².
- De acuerdo a los tres índices de error usados, la validación de los datos fue satisfactoria.
- Los parámetros encontrados y usados en la validación se pueden usar en la simulación del edificio no residencial.

Capítulo 4

Caso de estudio

En este capítulo se presenta la edificación no residencial usada para la simulación, su ubicación geográfica, la distribución de las zonas térmicas, características constructivas, propiedades termofísicas de los materiales y de los cristales, así como las condiciones ambientales de un año para la simulación.

4.1 Condiciones ambientales

El edificio que sirvió como base para realizar la simulación se encuentra en Cuernavaca Morelos. La región se caracteriza por tener un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano de acuerdo al mapa climatológico del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). La temperatura media anual del estado es de 21.5 °C y la precipitación promedio anual es 900 mm con lluvias sobre todo en verano. Las variables más relevantes para la simulación son temperatura, humedad relativa, radiación global y velocidad del viento. Estos datos se adquirieron de la estación meteorológica automática que se encuentra en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). Las estaciones meteorológicas tienen una cobertura de hasta 10 km dependiendo de las condiciones geográficas, si no hay montañas muy elevadas o diferente altitud, las mediciones se pueden tomar como

correctas dentro de ese radio. El edificio simulado se encuentra a 6.5 km de distancia de la estación por lo que está dentro del radio de cobertura.

El mes más cálido y frío corresponde a mayo y enero, con sus temperaturas promedio de 25.7 y 18.5 °C, respectivamente. Uno de los meses más lluviosos del año es septiembre y se ve reflejado en la mayor humedad relativa del año con 84% en promedio. La mayor radiación se presentó en julio con 283.6 W/m² y la velocidad del viento no supero el metro por segundo. En la Tabla 4.1 se presentan los promedios mensuales de las variables climáticas del año 2016 y en la Figura 4.1 se puede apreciar el comportamiento de estas variables de manera gráfica.

Tabla 4.1 Variables ambientales mensuales.

Mes	T. ambiente (°C)	HR (%)	Rad. Solar (W/m ²)	Vel. Viento (m/s)
Enero	18.5	50	185.8	0.8
Febrero	20.7	38	240.5	0.8
Marzo	22.0	45	246.2	0.9
Abril	25.1	35	282.0	0.9
Mayo	25.7	48	270.6	0.9
Junio	22.1	75	269.9	0.8
Julio	21.9	74	283.6	0.8
Agosto	21.9	80	268.3	0.7
Septiembre	21.2	84	241.7	0.6
Octubre	21.4	73	243.3	0.7
Noviembre	19.9	69	217.0	0.7
Diciembre	20.7	54	216.4	0.6
Prom. Anual	21.8	60	247.1	0.8

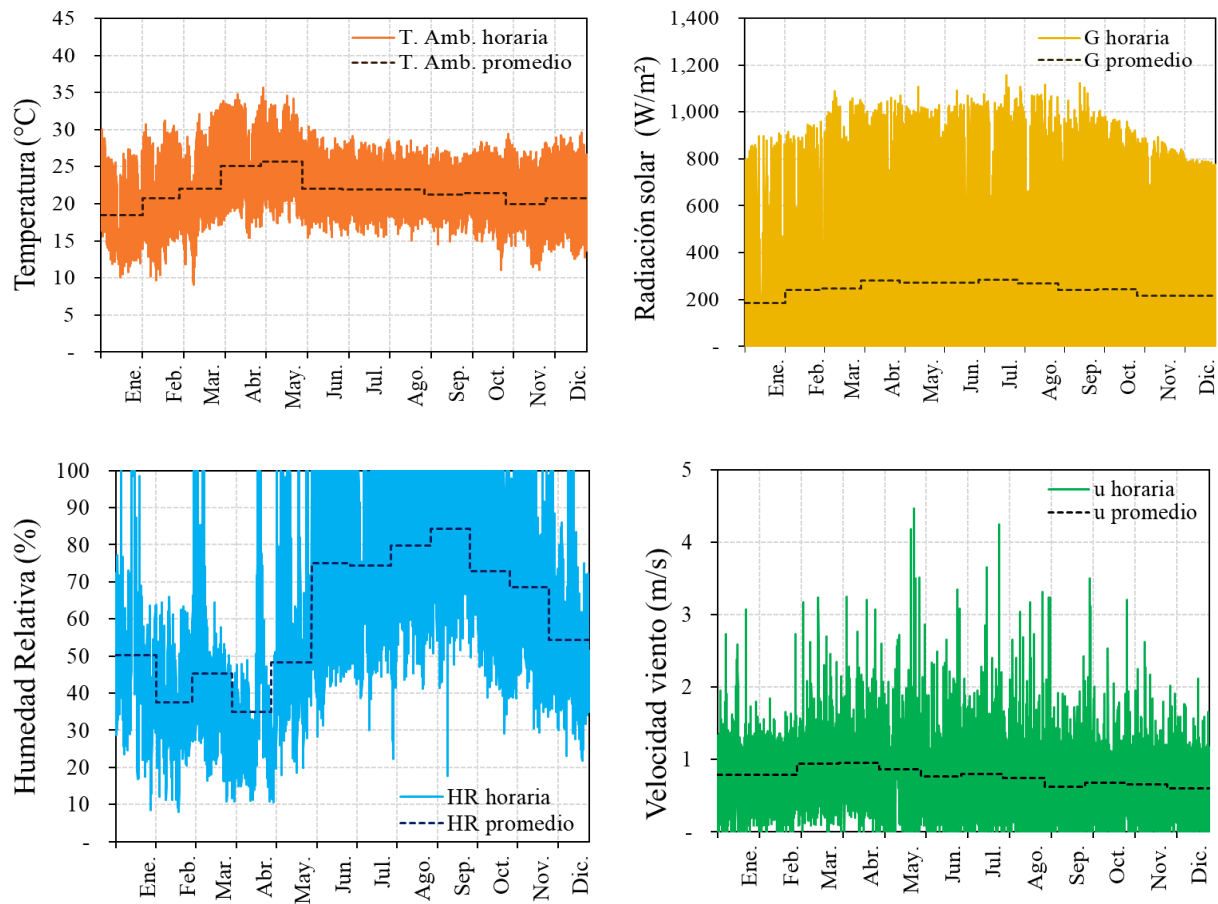


Figura 4.1 Variables climáticas para la simulación del edificio.

4.2 Edificio no residencial para la simulación

El edificio no residencial que se utilizó para la simulación es el edificio “Unidad Académica 1” de Cenidet Mecánica, que pertenece al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. El edificio se ubica en Apatzingán esquina con Av. Palmira S/N, CP 62490 Cuernavaca, Morelos. La localización geográfica (18°52'46.3"N 99°13'17.1"W) se puede apreciar en la Figura 4.2.

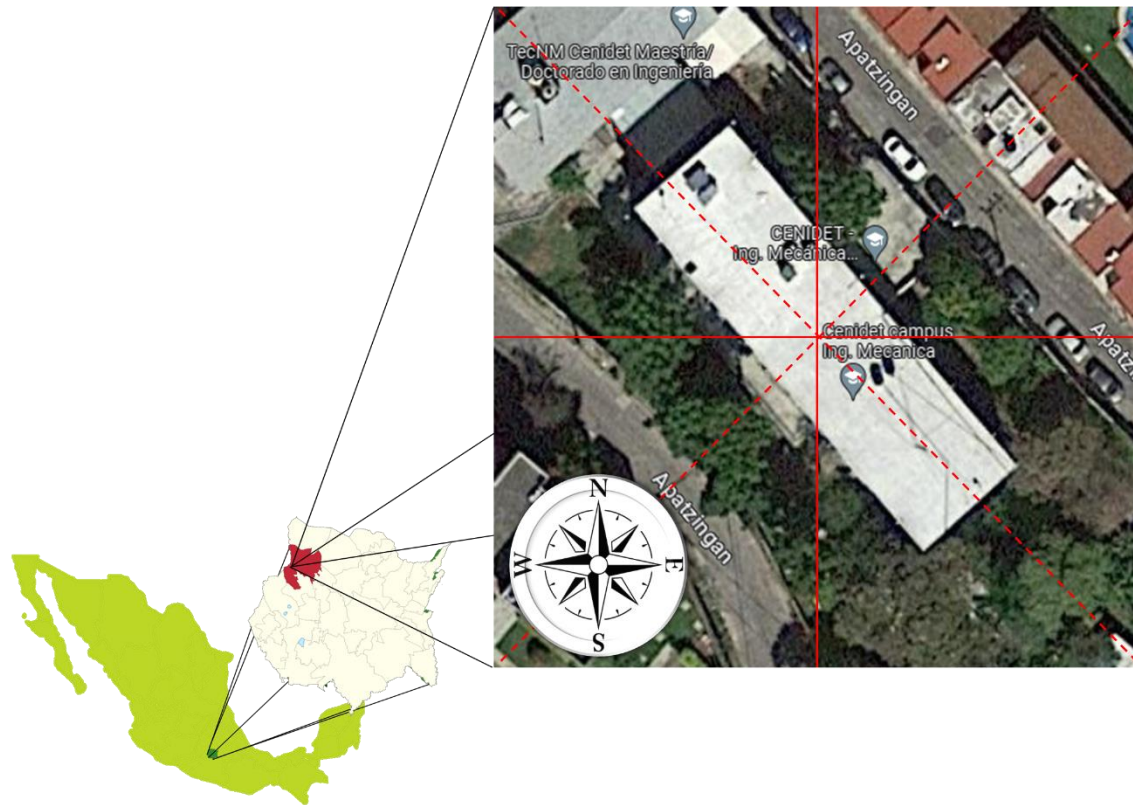


Figura 4.2 Ubicación del edificio simulado.

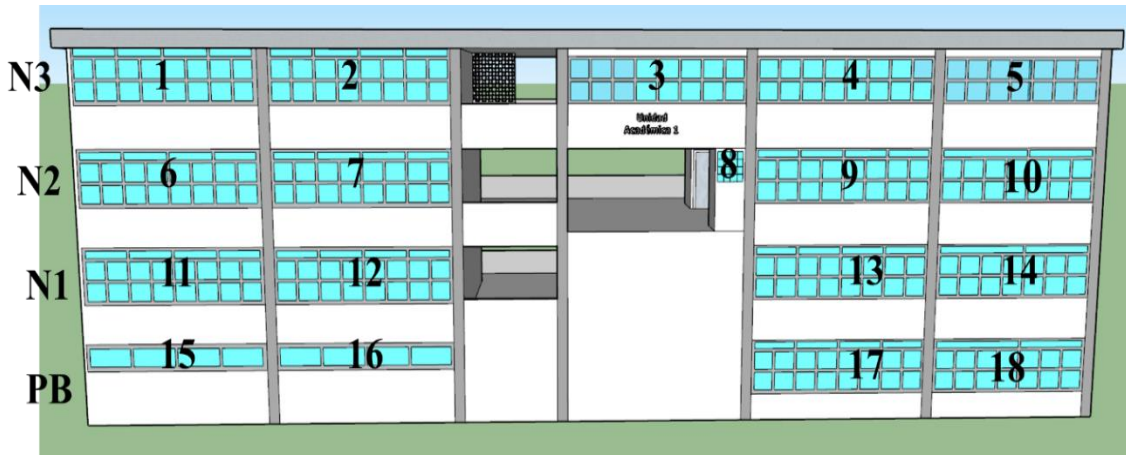
El edificio tiene cuatro niveles: Planta baja (PB) y niveles 1 (N1), 2 (N2) y 3 (N3). Está construido sobre un área de 40 m de largo y 10.4 m de ancho. El área del techo es de 416 m², la altura entre los niveles es de 2.7 m, la fachada principal está orientada hacia el noreste y no tiene edificios contiguos. Está rodeado por una serie de árboles que bloquean la radiación y le brindan sombra a la fachada frontal, trasera y derecha a diferentes horas del día. En la Tabla 4.2 se muestra la descripción del edificio y en el Apéndice C los planos.

Tabla 4.2 Descripción del edificio.

Descripción	Valor
Numero de niveles	4
Área superficie opaca	2,462 m ²
Área superficie transparente	356 m ²
Área del techo	416 m ²
Altura de los pisos	2.7 m

Las fachadas frontal y posterior tienen ventanas de vidrio claro de una hoja de 3 mm de espesor con marco de aluminio. Las puertas exteriores son tipo tambor y se encuentran en la fachada trasera del edificio. Las puertas interiores son de madera (nivel 2 y 3) y de PVC con vidrio (nivel 4). Ambas están ubicadas en las oficinas de los profesores y estudiantes. Las de PVC están compuestas 50% vidrio y 50% PVC. La ubicación y área de las aberturas se muestra en la Figura 4.3 y Tabla 4.3, así como las propiedades ópticas y térmicas de los vidrios utilizados en el edificio se muestran en la Tabla 4.4. Estas propiedades se obtuvieron del catálogo de vidrios de DesignBuilder, para un vidrio sencillo claro de 3 mm de espesor.

Vista frontal



Vista posterior

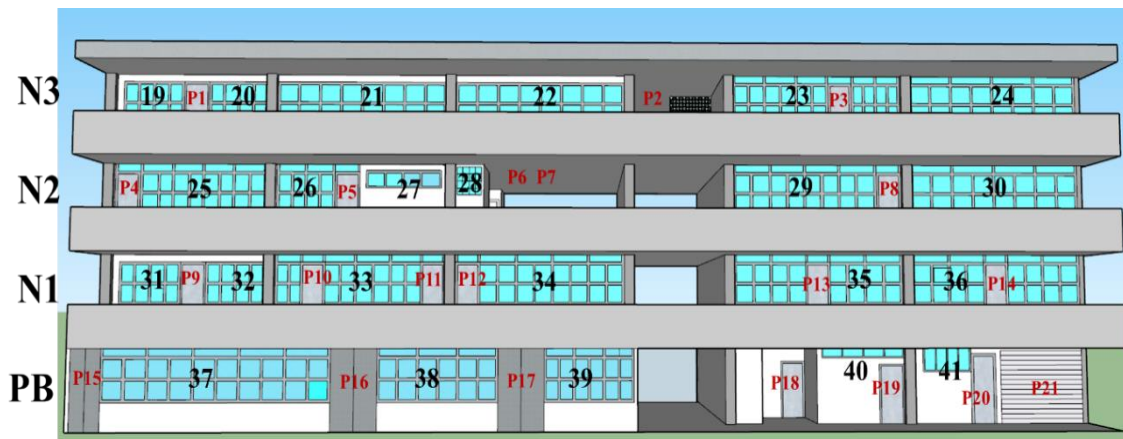


Figura 4.3 Ubicación de las aberturas del edificio.

Tabla 4.3 Posición y área de las aberturas.

Componente	Fachada	Nivel	Número de ventana	Área (m ²)		
V e n t a n a s	Frontal	4	1, 2	12.25		
			3-5	10		
		3	6, 7, 9, 10	8	0.95	
				11-14	12.5	
		2	15, 16	17, 18	12.5	
				19	3.64	
		Posterior	4	20	21, 22	10.2
					23	10.51
			3	24	25	9
					26	4.33
	2		27	28	1.88	
				29	10.42	
	1		30	31	11.9	
				32	3.65	
	Puertas		4,3,2	33	34	3.56
					35, 36	8.87
		1	37	38	10.37	
				39	10.4	
		1	40	41	14.89	
				15	7.88	
1		16, 17	18, 19	5.89		
			20	1.39		
1		21		1.74		
				2.45		



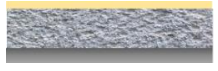

Tabla 4.4 Propiedades del vidrio.

Propiedades del vidrio			
Térmicas		Espesor (mm)	3.00
		Conductividad (W/mK)	1.00
Ópticas	Espectro solar	Transmitancia	0.871
		Reflectancia exterior	0.077
		Reflectancia interior	0.077
	Espectro Visible 400-700 nm	Transmitancia	0.907
		Reflectancia exterior	0.082
		Reflectancia interior	0.082
	Espectro Infrarrojo 700-4000 nm	Transmitancia	0
		Emisividad exterior	0.840
		Emisividad interior	0.840

Fuente: librería de DesignBuilder.

El techo y pisos del edificio están compuestos por una losa de concreto de 45 cm; el techo tiene una capa de impermeabilizante color terracota en el exterior y un falso plafón con un canal de aire de 16 cm al interior; los pisos internos (que, a su vez funcionan como techo del piso inferior) están recubiertos de azulejo y mortero; los muros son de ladrillo con un grosor de 18 cm recubiertos de mortero al exterior e interior. El orden de los componentes y las propiedades termofísicas de los materiales se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Propiedades termofísicas de los materiales de construcción.

Componente	Material	Espesor (cm)	Cp (J/kg K)	λ (W/m K)	ρ (kg/m ³)	Imagen
Techo	Impermeabilizante	0.2	1700	1.20	2300	
	Concreto	45	840	1.70	2000	
	Aire	16	1000	0.3	1000	
	Yeso	2	840	0.42	1200	
Muros	Mortero	1	837	0.72	1890	
	Ladrillo	16	800	0.81	1600	
	Mortero	1	837	0.72	1890	
Pisos intermedios	Mosaico	1	850	0.8	1700	
	Concreto	45	840	1.70	2000	
	Mortero	1	837	0.72	1890	
Piso nivel del suelo	Mosaico	1	850	0.8	1700	
	Concreto	45	840	1.70	2000	

Fuente: librería de DesignBuilder.

4.2.1. Zonas térmicas

El efecto del techo ventilado se aprecia sobre todo en el último nivel que es, el que está en contacto directo con el ambiente. En el último nivel del edificio se encuentran cubículos de trabajo; en el lado izquierdo se encuentra un pasillo y un pequeño almacén (zona 14), los 12 espacios restantes son cubículos de profesores y alumnos, el más pequeño de ellos tiene un área de 7.70 m² y el de mayor superficie 17.39 m². Del lado derecho se encuentran 3 espacios pequeños con un área de 8.46 m² y 3 espacios de mayor área que están separados por un pasillo (zona 15). Cada una de las zonas térmicas se observan en la Figura 4.4 y se enlistan en la Tabla 4.6, así como su área y volumen.

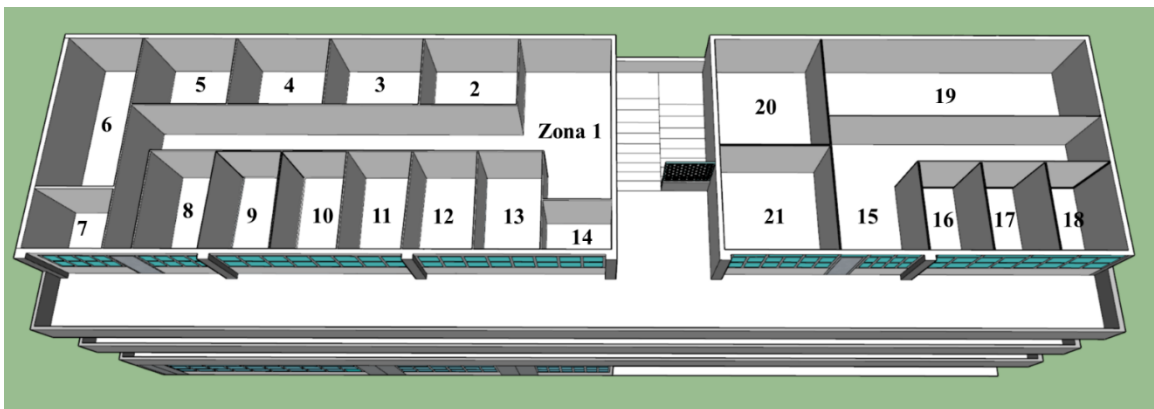


Figura 4.4 Zonas térmicas del 4to nivel (vista posterior).

Tabla 4.6 Características de las zonas térmicas.

Zonas	Área suelo (m ²)	Volumen (m ³)	Zonas	Área suelo (m ²)	Volumen (m ³)
1	59.45	160.52	11	9.12	24.62
2	10.31	27.83	12	9.09	24.54
3	10.57	28.53	13	9.09	24.54
4	10.57	28.53	14	4.94	13.34
5	10.57	28.53	15	31.67	85.51
6	17.39	46.94	16	8.46	22.84
7	7.7	20.78	17	8.46	22.84
8	9.11	24.59	18	8.46	22.73
9	9.12	24.62	19	35.21	95.08
10	9.12	24.62	20	19.64	53.01
			21	17.77	47.97

Las zonas internas tienen características similares en los muros y en la ubicación dentro del edificio, por lo que se pueden agrupar para que la visualización de resultados sea más clara. Así, en lugar de tener 21 zonas térmicas se tienen 6 zonas. En la figura 4.5 se puede apreciar cómo se agruparon las zonas, se tienen 3 zonas térmicas en cada extremo del edificio, las cuales están separadas por un espacio de 4 m donde se ubican las escaleras. Cada una de las zonas puede abreviarse como Z1, Z2, Z3, Z4, Z5 y Z6.

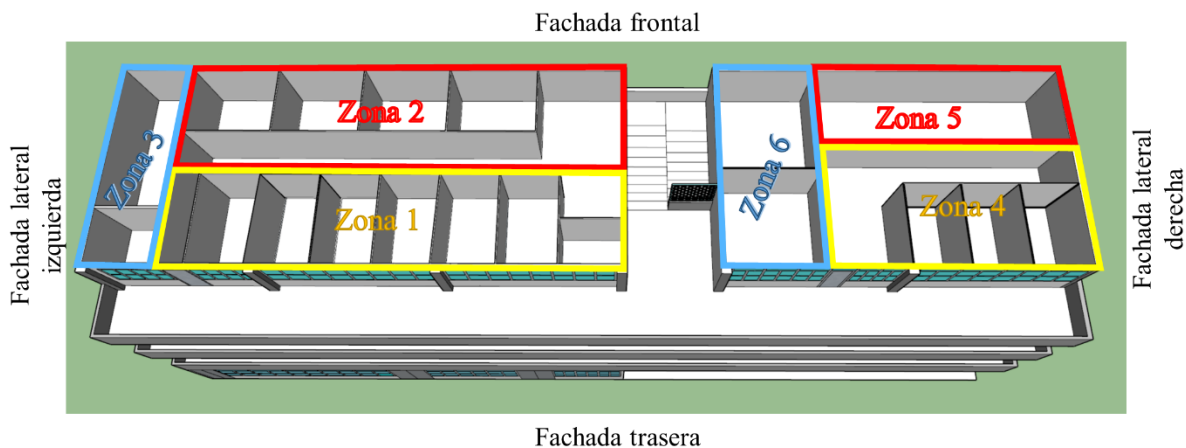


Figura 4.5 Disminución de zonas térmicas.

Capítulo 5

Resultados de la simulación

En esta sección se presenta el comportamiento térmico del último nivel de un edificio no residencial con techo tradicional y tres tipos de techos ventilados (lámina galvanizada, teja de barro y vegetación), bajo las condiciones climáticas de Cuernavaca, Morelos (México). Para analizar el desempeño térmico se compararon las temperaturas del aire interior, las temperaturas de la superficie exterior de la losa y las cargas térmicas, en evolución libre y con un sistema de acondicionamiento de aire para los cuatro tipos de techo. Finalmente, se presenta un análisis de costo beneficio de la implementación de los techos ventilados.

Características del techo de la edificación

El techo del edificio de Cenidet al igual que en la mayoría de los techos de las viviendas y grandes edificios, no disponen del área total del techo para hacer uso de él a conveniencia del usuario. Por ejemplo, instalar paneles fotovoltaicos, un techo verde o en este caso en particular, un techo ventilado. Pues el techo también es usado para ubicar tanques de almacenamiento de agua y gas, tuberías, cables eléctricos, tragaluces, unidades de refrigeración y ventilación que hacen imposible la instalación continua de

alguna técnica pasiva, por lo que se considera un 80% (333 m²) de la azotea para la instalación del techo ventilado y el 20% (83 m²) restante se reserva para la instalación del equipo que hace posible el buen funcionamiento de la edificación. En el caso del edificio de Cenidet, los tanques de agua y tuberías se encuentran en una esquina del techo (Figura 5.1), por lo que se puede instalar el techo ventilado en la mayor parte de la azotea. Teniendo en cuenta estas características del techo, en la simulación del edificio se consideró el techo ventilado solo en el área libre para su instalación.

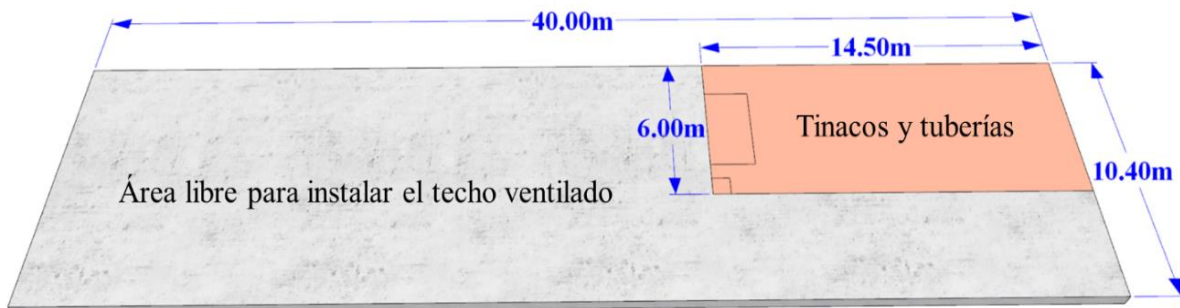


Figura 5.1 Área libre y ocupada del techo del edificio de Cenidet.

5.1 Simulación del edificio en evolución libre

5.1.1 Parámetros de simulación y consideraciones

La simulación del edificio con techo convencional y con los tres tipos de techo ventilado se realizó en evolución libre, esto es, que no se consideraron sistemas mecánicos de climatización. Las aberturas son de vidrio claro estándar, que permanecen cerradas todo el tiempo y no tienen sistemas de sombreado en ellas. No se consideraron fuentes de energía internas por iluminación, personal, equipo eléctrico o alguna otra fuente de energía. La infiltración se estableció en 0.7 de acuerdo con la norma ASHRAE. En la simulación no se consideraron edificios contiguos, árboles o alguna otra cosa que proporcione sombreado al edificio. Para calcular la temperatura de confort (T_c) se utilizó el modelo adaptativo propuesto por Nicol (2004), el cual considera el clima local (T_o), está enfocado a climas cálidos húmedos y se calcula como sigue:

$$T_c = 0.534T_o + 12.9$$

Para obtener el intervalo de confort o zona de confort, se le suman y restan 2 °C a la temperatura de confort (T_c), así se tienen los límites inferior y superior de la zona, como se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Intervalos mensuales de la temperatura de confort.

Mes	Temperatura (°C)			
	Ambiente	Mínima	Óptima	Máxima
Ene.	18.5	20.8	22.8	24.8
Feb.	20.7	22.0	24.0	26.0
Mar.	22.0	22.7	24.7	26.7
Abr.	25.1	24.3	26.3	28.3
May.	25.7	24.6	26.6	28.6
Jun.	22.1	22.7	24.7	26.7
Jul.	21.9	22.6	24.6	26.6
Ago.	21.7	22.5	24.5	26.5
Sep.	21.1	22.2	24.2	26.2
Oct.	21.4	22.3	24.3	26.3
Nov.	19.9	21.5	23.5	25.5
Dic.	20.7	22.0	24.0	26.0
Prom.	21.7	22.5	24.5	26.5

Para una mayor comprensión del comportamiento térmico de cada una de las zonas del edificio simulado, se muestra la trayectoria del sol desde una vista superior y posterior del edificio (Figura 5.2). La fachada principal (la posterior en la imagen) está orientada al noreste, por lo que en primavera-verano recibe la mayor parte de radiación; y por el contrario, la fachada posterior recibe mayor radiación en otoño-invierno.

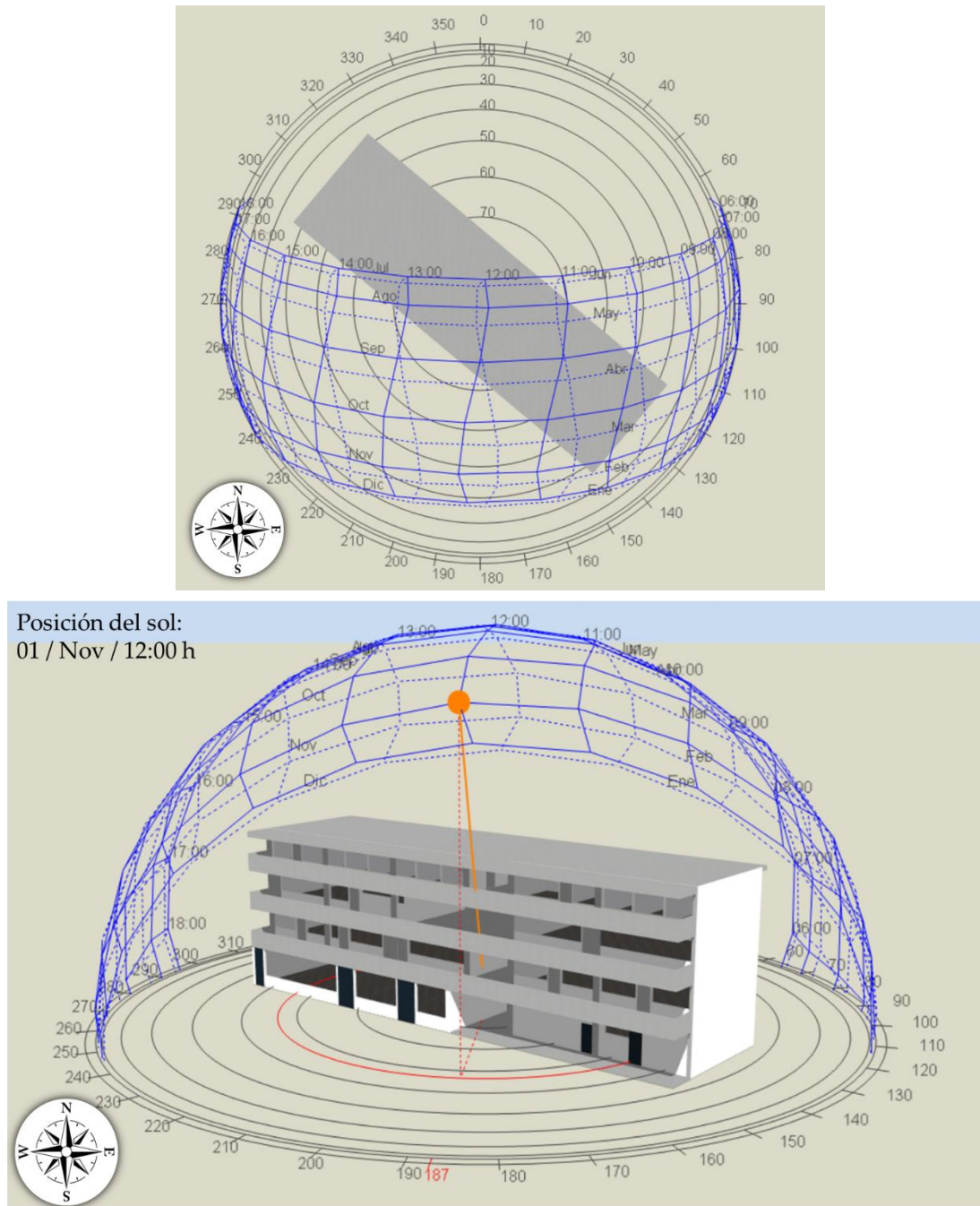


Figura 5.2 Trayectoria solar, desde una vista superior y posterior del edificio.

5.1.2 Temperatura interna de las zonas del cuarto nivel

En la Figura 5.3 se aprecia el comportamiento térmico anual de las zonas ubicadas en el cuarto nivel del edificio, con techo tradicional y los tres techos ventilados. El comportamiento de las zonas con todos los techos es el mismo, pero con diferentes temperaturas. Se puede notar que las mayores temperaturas se presentaron en el techo tradicional, las menores en el techo con teja e intermedias en el techo de lámina y vegetación. En la Zona 1 y 4 se ubican en la fachada trasera del edificio, la Zona 2 y 5 están al frente, estas cuatro zonas tienen 50% ventanas y 50% pared en sus fachadas. La Zona 3 y 6 se ubican en el costado izquierdo del edificio y son de menor área. En la temporada de otoño-invierno las Zonas 1 y 4 presentan la mayor temperatura, llegando a alcanzar hasta 34 °C en febrero. En la temporada de primavera-verano la Zona 3 presenta la mayor temperatura, llegando a alcanzar hasta 34.1 °C en abril, y esas temperaturas corresponden al techo tradicional. Por otro lado, en esos mismos meses y en esas zonas el techo de teja logró reducir 1.5 °C en febrero y 2.1 °C en abril. El techo de lámina redujo 0.9 °C en febrero y 1.4 °C en abril. Y el techo de vegetación logró reducir 1 °C en febrero y 1.4 °C en abril. Las Zonas 2 y 5 permanecen con la temperatura más baja a lo largo del año porque reciben menos radiación por las paredes, esto se debe a la orientación del edificio y al movimiento aparente del sol en cada mes del año. La franja azul de la Figura 5.3 indica la temperatura de confort, es importante mencionar que las zonas térmicas no alcanzan a entrar en esta zona la mayor parte del año, incluso con los techos ventilados. La razón de esto es porque hubo poco viento en este año en específico, la velocidad del viento no superó en promedio 1 m/s en ningún mes del año. En cambio, se revisaron otros datos climatológicos de años anteriores y se encontraron velocidades del viento arriba de los 10 m/s promedio mensual. El viento es de suma importancia para remover el calor por medio de la convección de cada una de las superficies del edificio, al tener un viento con baja velocidad la remoción de calor es poca y lenta, y por ello los resultados obtenidos.

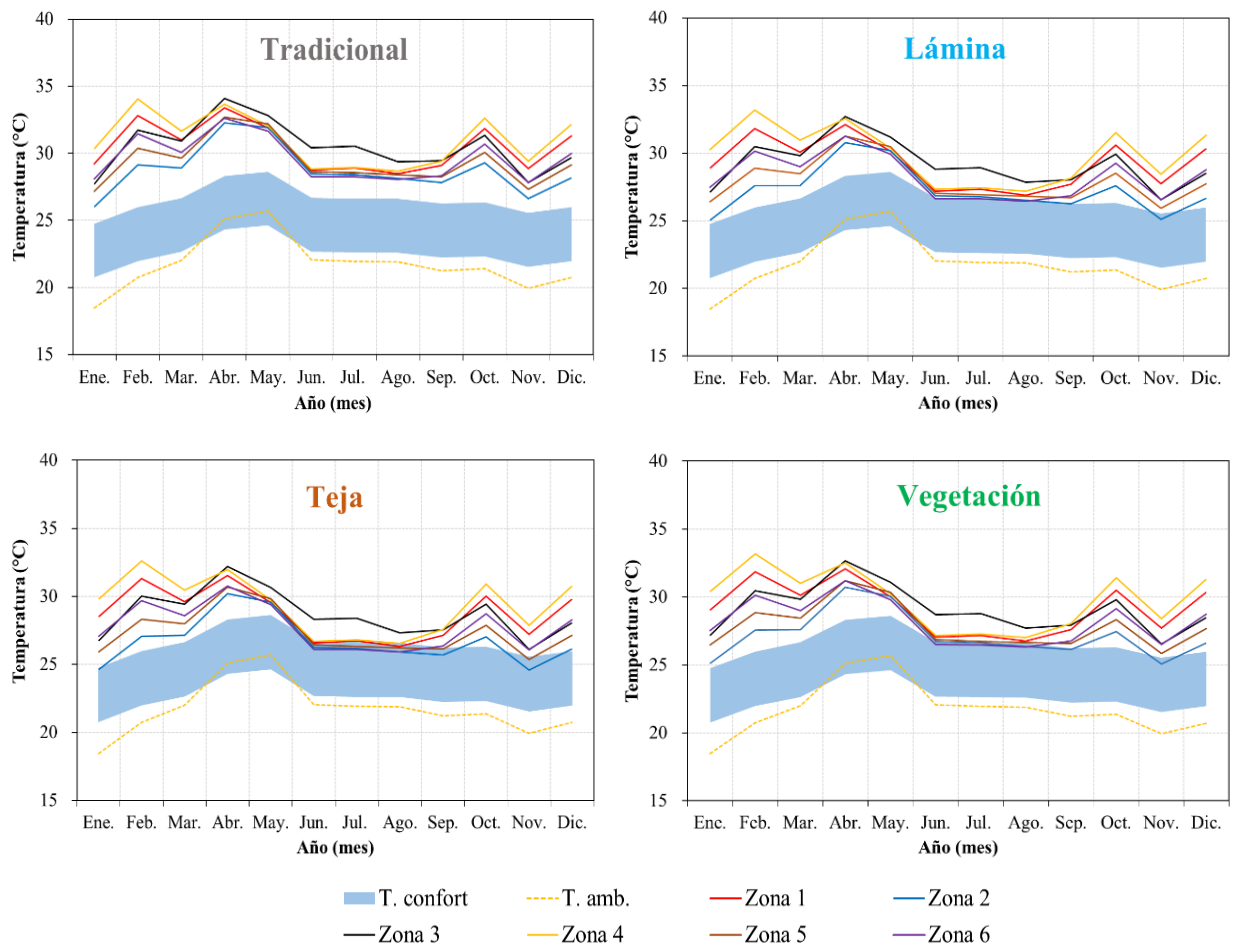


Figura 5.3 Temperatura promedio mensual para cada zona

5.1.3 Temperatura interna del cuarto nivel con los diferentes techos

La Figura 5.4 presenta el comportamiento de la temperatura interna del cuarto nivel para las cuatro configuraciones de techo: tradicional, ventilado de lámina, ventilado de teja y ventilado con vegetación. Se puede apreciar que la temperatura más alta se presenta en el techo tradicional, alcanzando una temperatura máxima en abril de 32.2 °C. Mientras que el techo ventilado que logró disminuir mayormente la temperatura interna fue el techo

ventilado con teja respecto al tradicional, se disminuyó en promedio anual 1 °C, y máximo 1.3 °C. Mientras que los techos ventilados de lámina y vegetación tienen un comportamiento muy similar, también lograron disminuir la temperatura interior hasta 0.8 °C, respecto al techo tradicional.

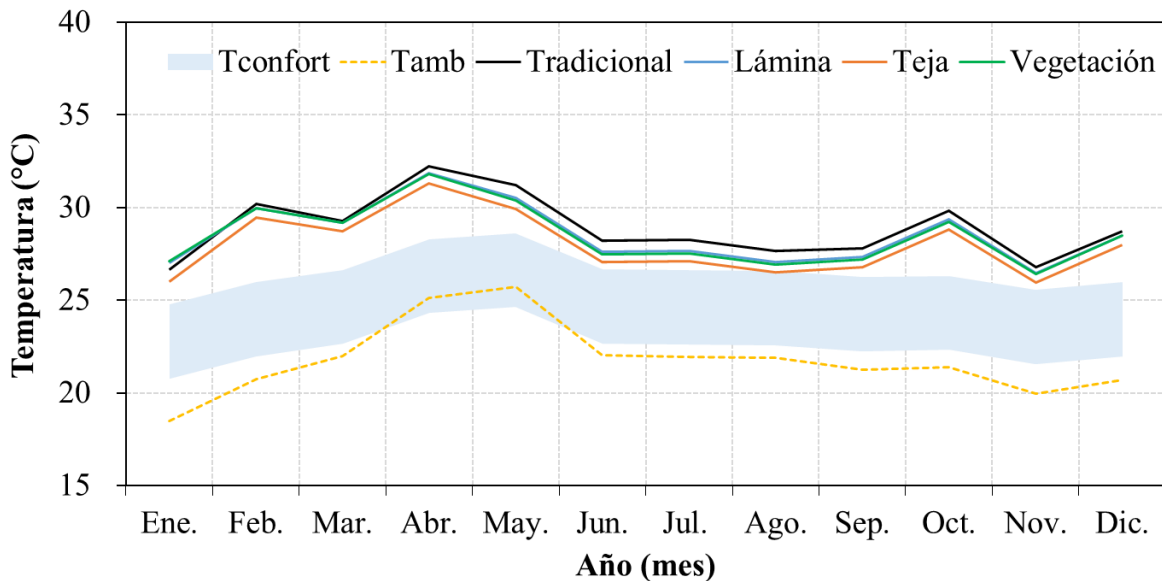


Figura 5.4 Temperatura interna del 4to nivel con los diferentes techos.

En la Tabla 5.2 se aprecian las temperaturas promedio mensuales para cada configuración de techo, así como la diferencia de temperatura que hay entre los techos. El signo negativo indica que el techo ventilado ocasionó que la temperatura interior aumentara, esto ocurre porque el canal de aire del techo ventilado funciona como aislante y evita que el calor interior se libere. Se observa que en los meses de mayo a julio se presenta la mayor reducción de temperatura con los techos ventilados de hasta 1.3 °C, siendo el techo de teja quien mejores resultados presentó, seguido del techo con vegetación.

Tabla 5.2 Temperatura interior mensual del 4to nivel del edificio, para las diferentes configuraciones

Mes	Temperatura (°C)								
	Trad.	Lámina	Difer.	Trad.	Teja	Difer.	Trad.	Veg.	Difer.
Ene.	26.6	27.0	-0.4	26.6	26.0	0.6	26.6	27.1	-0.5
Feb.	30.2	30.0	0.3	30.2	29.5	0.8	30.2	30.0	0.3
Mar.	29.3	29.2	0.1	29.3	28.7	0.5	29.3	29.2	0.1
Abr.	32.2	31.9	0.4	32.2	31.3	0.9	32.2	31.8	0.4
May.	31.2	30.5	0.7	31.2	29.9	1.3	31.2	30.4	0.8
Jun.	28.2	27.6	0.6	28.2	27.0	1.2	28.2	27.5	0.7
Jul.	28.3	27.7	0.6	28.3	27.0	1.2	28.3	27.5	0.8
Ago.	27.7	27.1	0.6	27.7	26.5	1.1	27.7	26.9	0.7
Sep.	27.8	27.3	0.5	27.8	26.8	1.0	27.8	27.2	0.6
Oct.	29.8	29.4	0.4	29.8	28.8	1.0	29.8	29.3	0.6
Nov.	26.8	26.5	0.3	26.8	26.0	0.8	26.8	26.4	0.3
Dic.	28.7	28.5	0.2	28.7	28.00	0.7	28.7	28.5	0.2
Prom.	28.9	28.5	0.4	28.9	28.0	1.0	28.9	28.5	0.4

5.1.4 Temperatura de la superficie exterior de la losa

La temperatura de la losa se ve afectada directamente por la radiación incidente y por las condiciones ambientales, y en consecuencia afecta el ambiente interior de la edificación. El objetivo de los techos ventilados es bloquear la radiación solar que llega al techo primario de la edificación para evitar el sobrecalentamiento de la losa. En la Figura 5.5 se observa el comportamiento térmico de las diferentes losas, con los diferentes techos ventilados. Se aprecia que la mayor temperatura se encuentra en la losa tradicional los meses de abril y mayo, presentando una temperatura máxima de 33.8 °C. El techo ventilado que disminuye mayormente la temperatura de la losa es el techo de teja, disminuyendo 7.4 °C en mayo, respecto al tradicional. Mientras que los techos de lámina y vegetación tienen un comportamiento muy similar y disminuyen 4.9 y 5.3 °C en el mismo mes. Las mayores reducciones de temperatura de la losa se presentan en los meses con la temperatura ambiente más alta, que son de abril a septiembre.

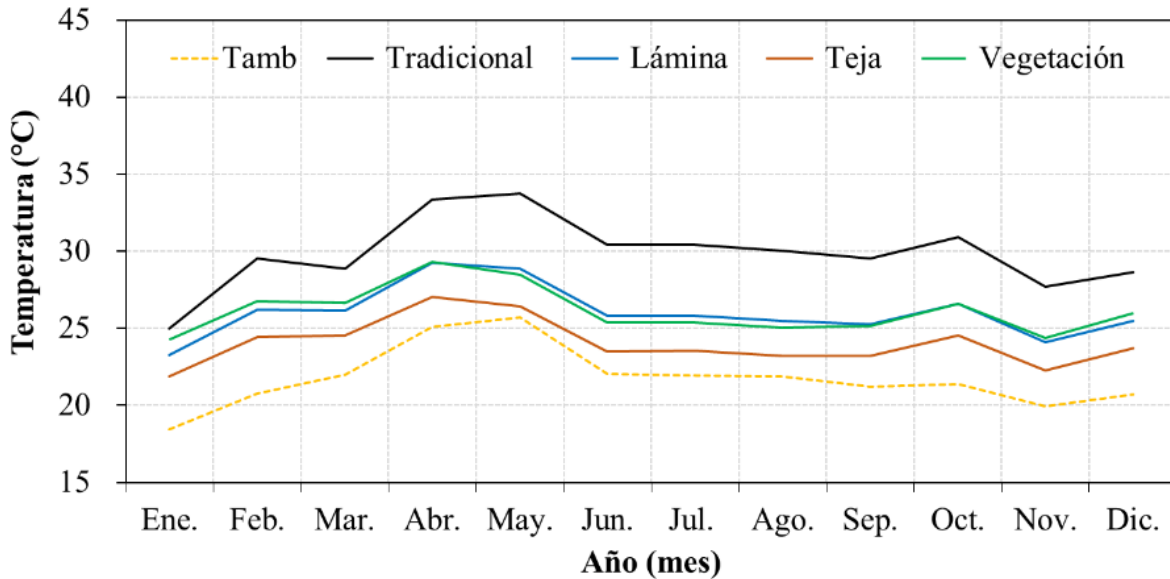


Figura 5.5 Temperatura de la superficie exterior de la losa para cada configuración

En la Tabla 5.3 se aprecian las temperaturas promedio mensuales de la superficie de la losa de la edificación para cada tipo de techo, así como la diferencia de temperatura que hay entre los sistemas comparados. El mejor desempeño se observa en el techo de teja, este sistema redujo la temperatura hasta 7.4 °C en mayo, y en promedio anual 5.8 °C. La reducción de temperatura en el techo de teja fue mayor debido a los múltiples canales de aire que se forman entre las tejas, aumentando la resistencia al flujo de calor hacia el interior. Para los techos de lámina y vegetación, el comportamiento es muy similar, ambos redujeron en promedio 3.7 °C respecto al techo tradicional.

Tabla 5.3 Temperatura mensual de la superficie exterior de la losa, para las diferentes configuraciones.

Mes	Temperatura (°C)								
	Trad.	Lám.	Dif.	Trad.	Teja	Dif.	Trad.	Veg.	Dif.
Ene.	25.0	23.3	1.7	25.0	21.9	3.1	25.0	24.3	0.7
Feb.	29.5	26.2	3.3	29.5	24.4	5.1	29.5	26.7	2.8
Mar.	28.9	26.1	2.7	28.9	24.5	4.3	28.9	26.6	2.2
Abr.	33.4	29.2	4.1	33.4	27.0	6.3	33.4	29.3	4.1
May.	33.8	28.9	4.9	33.8	26.4	7.4	33.8	28.5	5.3
Jun.	30.4	25.8	4.7	30.4	23.5	6.9	30.4	25.4	5.1
Jul.	30.4	25.8	4.6	30.4	23.5	6.8	30.4	25.4	5.0
Ago.	30.0	25.5	4.5	30.0	23.2	6.8	30.0	25.1	5.0
Sep.	29.5	25.3	4.3	29.5	23.2	6.3	29.5	25.1	4.4
Oct.	30.9	26.6	4.3	30.9	24.5	6.4	30.9	26.6	4.3
Nov.	27.7	24.1	3.6	27.7	22.3	5.4	27.7	24.4	3.3
Dic.	28.7	25.5	3.2	28.7	23.7	4.9	28.7	26.0	2.7
Prom	29.8	26.0	3.8	29.8	24.0	5.8	29.8	26.1	3.7

5.1.5 Comportamiento semanal del edificio

Es importante conocer el comportamiento térmico del edificio con los diferentes tipos de techo ventilado en los peores escenarios, esto es, en la semana más fría y más cálida de todo el año. De esta manera, se tiene la certeza de que el funcionamiento de los techos recaerá dentro de estos dos puntos opuestos, y además se puede apreciar cómo evoluciona la temperatura al pasar las horas. Estas dos semanas se tomaron en función de la temperatura ambiente, ya que es el parámetro de interés que afecta el comportamiento interior de la vivienda. El mes más frío del año es enero, y la semana bajo estas condiciones comprende los días del 21-27 de este mismo mes. La semana cálida se tomó del mes con la temperatura ambiente más alta del año, este periodo comprende del 09-15 de abril.

Temperatura interior en la semana más fría y cálida del año

En la Figura 5.6 se observa la temperatura interior del 4to nivel del edificio para la semana fría y la semana cálida. En enero la temperatura interior con losa tradicional alcanza hasta

39.7 °C en su punto más alto el día 21, y se redujo en ese mismo punto a 37.4, 37.0 y 36.4 °C, con el techo de lámina, vegetación y teja, respectivamente. Lo que significa que el techo de teja presentó los mejores resultados al reducir 3.3 °C, respecto al techo tradicional. La temperatura interior con losa tradicional es mayor de 14:00 a 23:00 h, alcanzando su punto máximo alrededor de las 19:00 h, después de ese horario la temperatura comienza a disminuir llegando a su punto más bajo alrededor de las 10:00 h del día siguiente. La temperatura interna con losa tradicional es mayor durante el día y menor durante la noche, lo que indica que la losa se calienta más rápido y afecta el interior; pero, por el contrario, también pierde calor más rápido que los otros techos ventilados. Este fenómeno se debe al canal de aire, ya que funciona como un aislante, y este comportamiento es respaldado con los valores medidos en los módulos de prueba. La temperatura interna con techo de teja se mantuvo por debajo de los otros techos a lo largo de la semana, disminuyendo 0.5 °C en promedio, respecto al tradicional. Por otro lado, en la semana cálida, la temperatura con techo tradicional se mantuvo más alta durante el día y la noche; y con techo de teja se mantuvo más baja durante el día y la noche. En la semana de abril las temperaturas superan los 40 °C, y el techo de teja redujo hasta 4.9 °C y en promedio 1.9 °C, comparándolo con el tradicional. En la Tabla 5.4 se presentan las temperaturas mínimas, máximas y promedios de cada semana con los diferentes tipos de techos.

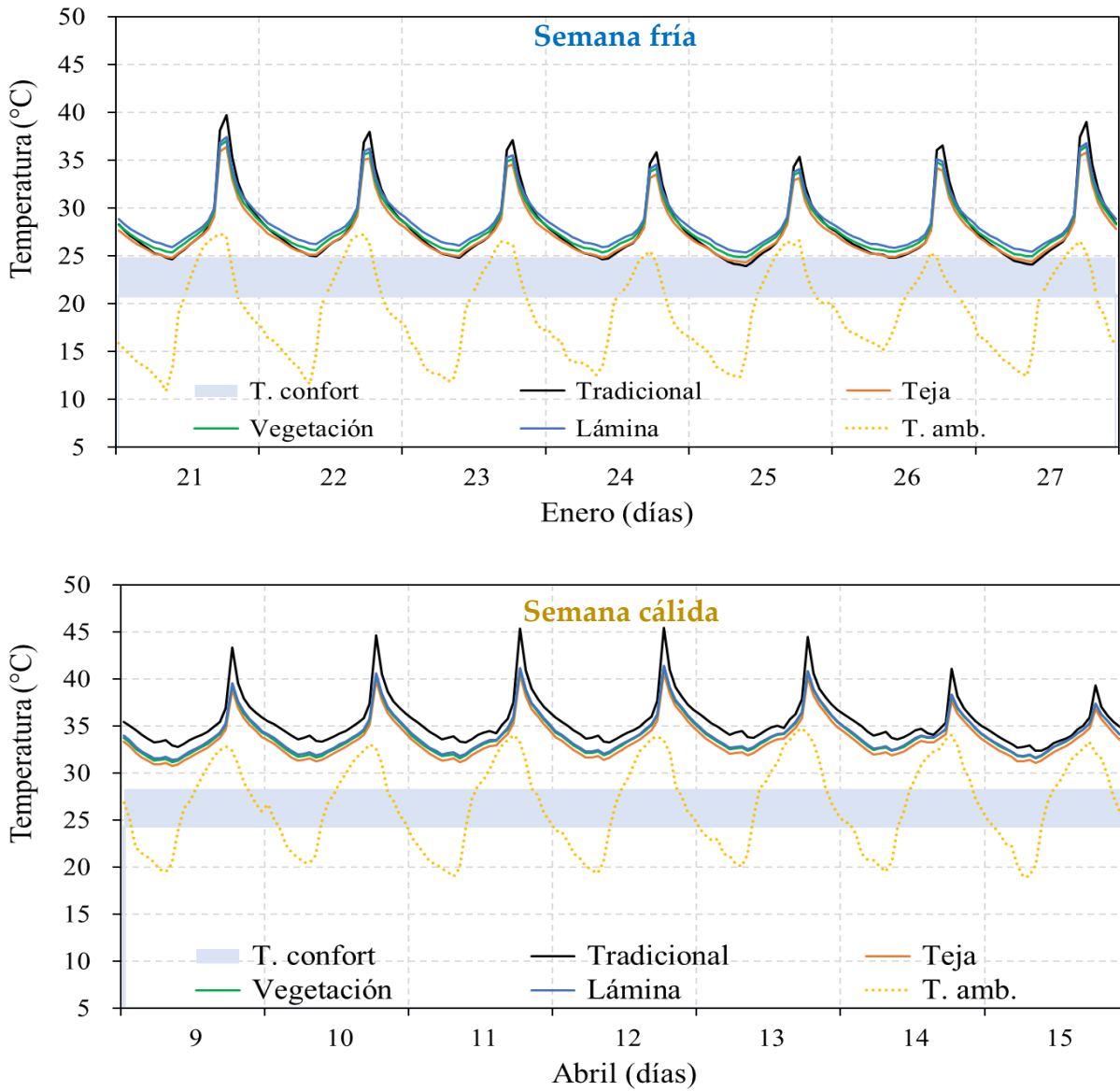


Figura 5.6 Temperatura interna del 4to nivel con los diferentes techos.

Tabla 5.4 Temperatura interior del 4to nivel del edificio con las diferentes configuraciones

Tipo de techo	Temperatura (°C)					
	Semana fría			Semana cálida		
	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio
Tradicional	24.0	39.7	27.9	32.3	45.4	35.4
Lámina	25.4	37.4	28.5	31.4	41.4	34.2
Teja	24.3	36.4	27.5	30.7	40.7	33.5
Vegetación	24.9	37.0	28.0	31.1	41.3	34.0

Temperatura en la superficie exterior de la losa en la semana más fría y cálida del año

La Figura 5.7 presenta la temperatura de la superficie externa de la losa para la semana fría (enero) y cálida (abril). Se observa que en ambas semanas la temperatura de la superficie de la losa tradicional, es más alta la mayor parte del día y la noche. Mientras que la losa con techo de teja y vegetación muestran las temperaturas más bajas. Los días 11, 13 y 14 de abril el comportamiento de las losas presenta una caída de temperatura, esto se debe a que la velocidad del viento aumentó de 0.2 hasta 1.5 m/s de 12:00 a 17:00 h, lo que provocó que la remoción de calor por efectos de la convección fuera mayor. En la semana cálida la temperatura de la losa común alcanza hasta 55 °C, mientras que en ese mismo horario los techos ventilados presentan 34.6, 36.2 y 41.4 °C en la losa de teja, vegetación y lámina, respectivamente. Los techos ventilados pueden reducir hasta 22.2, 20 y 14.3 °C con el techo de teja, vegetación y lámina, respectivamente. En promedio el techo que mayormente reduce la temperatura es el techo de tejas, con 7.1 °C. Los valores más sobresalientes se observan en la Tabla 5.5.

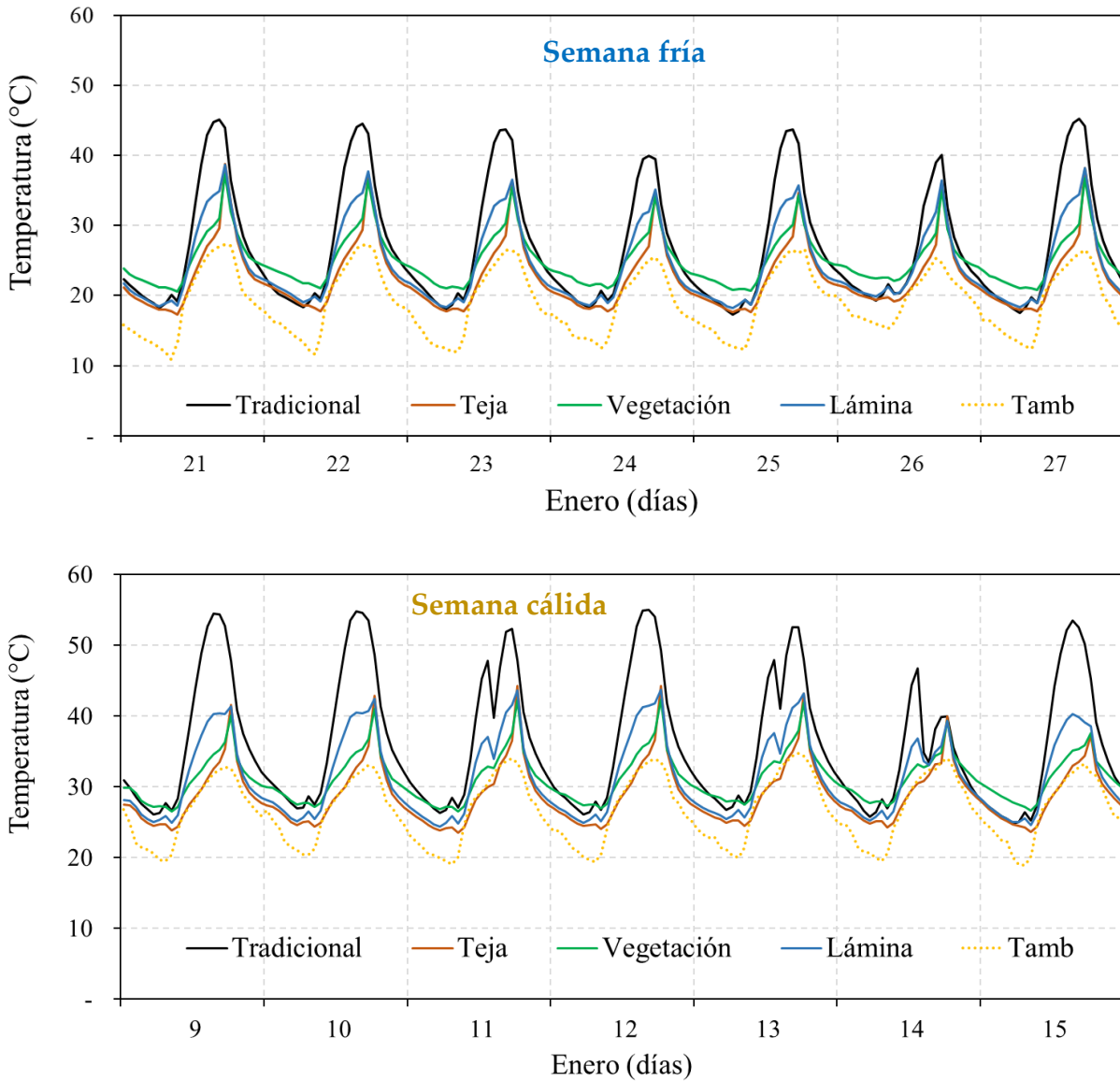


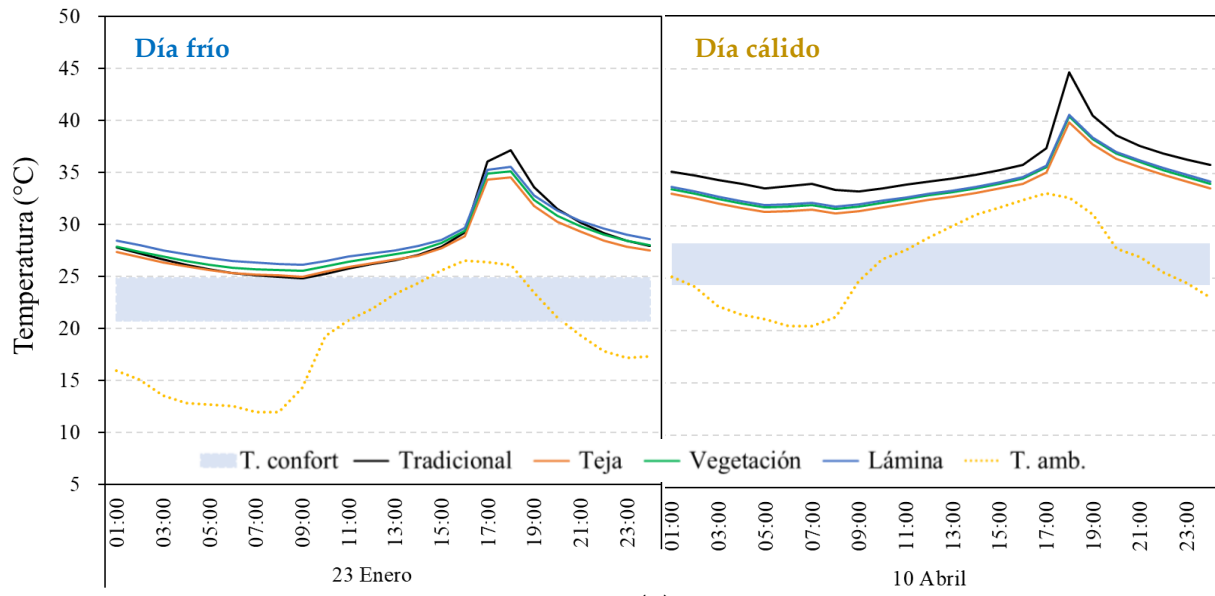
Figura 5.7 Temperatura de la superficie de la losa con los diferentes techos.

Tabla 5.5 Temperatura de la superficie de la losa horaria con las diferentes configuraciones.

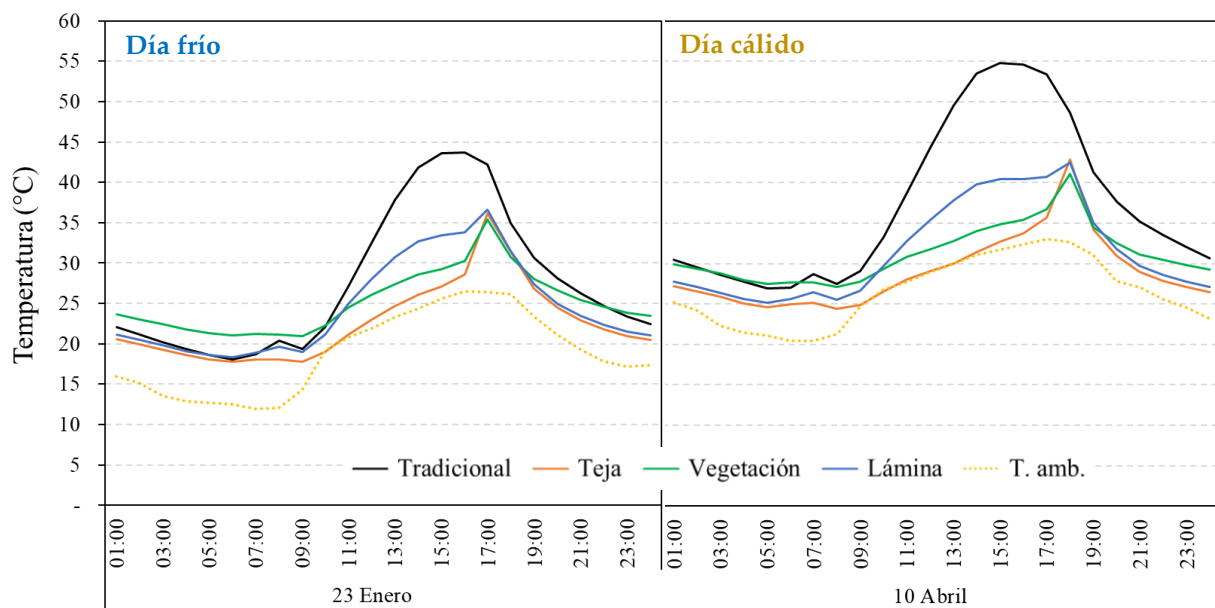
Tipo de techo	Temperatura (°C)					
	Semana fría			Semana cálida		
	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio
Tradicional	17.3	45.3	26.9	24.8	55.0	36.0
Lámina	18.2	38.7	24.4	24.4	43.7	31.3
Teja	17.3	38.8	22.6	23.5	44.3	28.9
Vegetación	20.5	37.4	25.1	26.5	42.3	31.2

En la Figura 5.8 se observa el comportamiento diario de la temperatura interior y de la superficie de la losa con los diferentes techos ventilados. La temperatura interna (Figura 5.8a) en el día frío es mayor con el techo tradicional durante las horas de radiación, mientras que en las noches es la más baja. Sus valores máximos se alcanzan a las 16:00 h y los menores a las 8:00 h. De los techos ventilados el de lámina presentó las temperaturas más altas, en promedio 1 °C sobre el techo de teja. En el día cálido, la temperatura interna con el techo tradicional fue mayor en todas las horas de día, en promedio es 1.5 °C superior a la temperatura interna con los demás techos. Con el techo tradicional se alcanzó hasta 45 °C y con los techos ventilados se redujo a 40.6, 40.4 y 39.9 °C, con el techo de lámina, vegetación y teja, respectivamente.

Las temperaturas de la superficie de la losa para un día frío y un día cálido se muestran en la Figura 5.8b. En ambos días la temperatura de la losa desnuda es mayor, en el día frío llega hasta 43.7 °C y en el día cálido hasta 54.8 °C. Al rededor de las 9:00 h la temperatura comienza a aumentar en todos los techos, y de los ventilados el de lámina gana energía con mayor rapidez, seguido por el de vegetación y teja. La temperatura máxima de los tres techos ventilados se encuentra aproximado a las 18:00 h y alcanza hasta 35 °C. Mientras que en el día cálido la temperatura de la losa de los techos ventilados llega hasta los 42 °C.



(a)



(b)

Figura 5.8 Comportamiento diario de la temperatura: (a) interna, (b) superficie exterior de la losa.

5.1.6 Conclusiones de la simulación en evolución libre

- Ninguna configuración de techo alcanzó la temperatura de confort, se requiere que el sistema disminuya más la temperatura interior, para ello se necesitarían sistemas de enfriamiento, ya que solo el techo ventilado no logra disminuir la temperatura lo suficiente.
- Estos resultados se deben al año climatológico específico que se usó, donde las velocidades del viento son bajas.
- El edificio se simuló sin ningún tipo de sombreado en las ventanas y fachadas, en este punto es el peor escenario; para lograr una mayor disminución de temperatura se recomienda colocar cortinas o persianas en las ventanas, ya que las ventanas ocupan el 50% de la fachada frontal y trasera.
- Los resultados simulados del edificio con los diferentes techos ventilados concuerdan con los datos experimentales, en ambos casos resultó que la mejor opción para disminuir la temperatura interior es usar un techo ventilado de teja.
- El techo con losa tradicional presenta las temperaturas más altas en todos los puntos, y el techo con teja presenta las temperaturas más bajas.
- El techo con losa tradicional, presenta la temperatura más alta en el aire interior y en la superficie exterior del techo, con 32.2 °C y 33.8 °C, respectivamente.
- El techo ventilado con teja de barro, logró disminuir la temperatura en promedio anual 1 °C en el aire interior y 5.8 °C en la superficie exterior de la losa, respecto al tradicional.
- El techo ventilado con lámina, logró disminuir la temperatura en promedio anual 0.4 °C en el aire interior y 3.8 °C en la superficie exterior de la losa, respecto al tradicional.
- El techo ventilado con vegetación, logró disminuir la temperatura en promedio anual 0.4 °C en el aire interior y 3.7 °C en la superficie exterior de la losa, respecto al tradicional.

- En el análisis semanal las temperaturas interiores superan los 40 °C, y el techo de teja reduce hasta 3.3 °C y en promedio 1.2 °C, comparándolo con el tradicional.

5.2 Simulación del edificio con el sistema de enfriamiento

5.2.1 Parámetro de simulación y consideraciones

La simulación del edificio con techo convencional y con los tres tipos de techo ventilado (lámina galvanizada, teja de barro y vegetación) se realizó en evolución libre y con un sistema de aire acondicionado con las mismas consideraciones de la sección 5.1.1. El sistema de climatización o aire acondicionado se programó para que funcione los días laborables y en horario donde existe mayor flujo de personas, de lunes a viernes de 9:00-19:00 h. El set point que se utilizó para cada mes fue la temperatura óptima reportada en la Tabla 5.1.

5.2.2 Temperatura interna y demanda energética por zonas

En esta sección se comparan las temperaturas interiores en evolución libre contra las temperaturas interiores con el sistema de climatización del último nivel del edificio, esto porque el último nivel es mayormente afectado por las condiciones ambientales y radiación solar. El techo tradicional consta de una losa de concreto recubierta de impermeabilizante, y los techos ventilados están formados por una losa con las mismas características que la losa tradicional al cual se le agregó un techo secundario de lámina, teja y vegetación con un espacio de aire de 15 cm. Primero, para reducir la temperatura interior del edificio se propuso un sistema solar pasivo, en este caso particular los techos ventilados. Sin embargo, este sistema fue insuficiente para alcanzar la temperatura de la zona de confort, por lo que se propuso además del techo ventilado un sistema de aire

acondicionado. Esto indica que el edificio se simula con un equipo de climatización que cubra la demanda requerida para mantener las zonas dentro del intervalo de confort.

Edificio con techo tradicional

En la Tabla 5.6 se presentan las temperaturas del aire interior del cuarto nivel del edificio con techo tradicional, tanto en evolución libre (EL) como con el sistema de climatización o aire acondicionado (AA). De acuerdo a los datos, la zona con mayor temperatura es la zona 4 (ver Figura 4.5 para distribución de zonas), llegando a presentar hasta 35.7 °C en EL, una vez activado el aire acondicionado la temperatura baja a 33 °C. Estos valores a primera vista podrían parecer que no están dentro de las temperaturas de confort, pero hay que recordar que estos valores son promedios mensuales y el sistema de climatización tiene un horario de funcionamiento, por lo que, solamente en las horas de funcionamiento la temperatura se encuentra en la franja de confort. La zona 2 es el espacio que presenta la temperatura interna más baja llegando a 26.8 °C en enero. En la Figura 5.8 se muestra la demanda de energía para refrigeración para cada una de las zonas térmicas. Se aprecia que la Zona 1 y 2, son los espacios que requieren de mayor energía durante todo el año, llegando a alcanzar hasta 800 kWh en el mes de mayo. Por el contrario, la zona que requiere menor enfriamiento es la Zona 3, estas tres zonas están en la parte izquierda del edificio (viéndolo por la parte trasera).

Tabla 5.6 Temperatura del aire interior con techo tradicional.

Mes	Temperatura promedio mensual con techo tradicional (°C)																	
	Zona 1			Zona 2			Zona 3			Zona 4			Zona 5			Zona 6		
	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.
Ene.	30.6	28.9	1.6	26.8	25.3	1.5	28.5	27.0	1.5	31.9	29.8	2.1	28.2	26.2	2.0	29.1	27.4	1.7
Feb.	34.3	32.0	2.3	30.1	27.6	2.5	32.6	30.4	2.2	35.7	33.0	2.8	31.5	28.4	3.1	32.6	30.2	2.4
Mar.	31.9	29.4	2.5	29.5	26.9	2.6	31.5	29.0	2.5	32.7	29.7	2.9	30.3	27.2	3.1	30.7	28.1	2.6
Abr.	34.1	31.4	2.7	32.8	29.3	3.5	34.6	31.8	2.8	34.4	31.4	3.1	33.3	29.4	3.8	33.1	30.3	2.8
May.	32.2	29.2	2.9	32.2	28.5	3.7	33.0	29.9	3.1	32.3	29.0	3.3	32.5	28.6	3.9	31.7	28.7	3.0
Jun.	29.2	27.1	2.1	28.9	26.6	2.2	30.8	28.5	2.3	29.2	27.0	2.3	29.0	26.6	2.4	28.4	26.5	2.0
Jul.	29.4	27.4	2.0	28.8	26.7	2.1	30.9	28.7	2.2	29.4	27.2	2.1	28.9	26.7	2.2	28.5	26.6	1.8
Ago.	28.9	26.9	2.0	28.5	26.4	2.1	29.7	27.6	2.1	29.1	26.9	2.2	28.8	26.5	2.3	28.3	26.4	1.9
Sep.	29.8	27.8	2.0	28.3	26.4	1.9	29.9	27.9	2.0	30.1	27.8	2.3	28.8	26.5	2.2	28.7	26.8	1.9
Oct.	33.0	30.5	2.5	30.1	27.4	2.7	32.1	29.5	2.5	33.9	31.0	2.9	31.0	27.8	3.2	31.5	29.0	2.6
Nov.	29.8	27.8	2.0	27.2	25.4	1.7	28.3	26.6	1.7	30.4	28.0	2.4	28.0	25.8	2.2	28.4	26.5	1.9
Dic.	32.5	30.2	2.3	28.9	26.7	2.2	30.3	28.3	2.1	33.5	30.7	2.8	30.0	27.3	2.7	30.8	28.5	2.3
Min.	28.9	26.9	1.6	26.8	25.3	1.5	28.3	26.6	1.5	29.1	26.9	2.1	28.0	25.8	2.0	28.3	26.4	1.7
Máx.	34.3	32.0	2.9	32.8	29.3	3.7	34.6	31.8	3.1	35.7	33.0	3.3	33.3	29.4	3.9	33.1	30.3	3.0
Prom	31.3	29.1	2.2	29.3	26.9	2.4	31.0	28.8	2.2	31.9	29.3	2.6	30.0	27.2	2.8	30.1	27.9	2.2

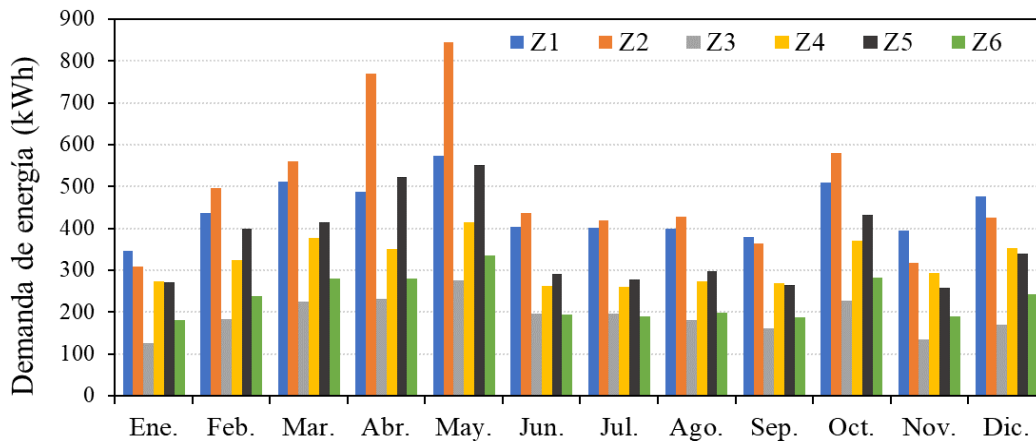


Figura 5.9 Demanda de energía para enfriamiento del techo tradicional.

Edificio con techo ventilado de lámina

En la Tabla 5.7 se observan las temperaturas internas en EL y con AA con el techo ventilado de lámina. Igual que en el caso anterior (techo tradicional), las zonas con mayor y menor temperatura son las Zonas 4 y 2. La Z4 recibe radiación directa en dos de sus fachadas, además de una parte del techo, esto porque el techo está ocupado por tuberías y un tinaco de agua, y en ese espacio no hay techo ventilado. Mientras que la Z2 solo recibe radiación en una fachada. Estas diferencias son las que hacen que la temperatura aumente más en la Z4 que en la Z2. La Figura 5.9 muestra el comportamiento energético del edificio, se observa que la demanda de energía es menor en las zonas 3 y 6 a lo largo del año, esto debido a que son las zonas más pequeñas. Por el contrario, la zona con mayor requerimiento es la zona 5, en este espacio no hay techo ventilado por lo que recibe radiación directa sobre el techo todo el tiempo y la temperatura interna aumenta con mayor facilidad.

Tabla 5.7 Temperatura del aire interior con techo de lámina.

Mes	Temperatura promedio mensual con techo de lámina (°C)																	
	Zona 1			Zona 2			Zona 3			Zona 4			Zona 5			Zona 6		
	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.
Ene.	30.5	28.9	1.5	26.5	25.1	1.3	28.4	27.2	1.3	33.7	31.1	2.6	29.9	27.1	2.8	30.2	28.2	2.0
Feb.	33.4	31.4	2.0	29.0	26.9	2.1	31.8	30.0	1.8	37.3	34.1	3.1	32.9	29.1	3.8	33.4	30.8	2.6
Mar.	31.3	29.0	2.3	28.8	26.4	2.4	31.0	28.8	2.2	33.8	30.4	3.4	31.5	27.6	3.9	31.4	28.5	2.9
Abr.	33.1	30.7	2.4	31.9	28.9	3.0	33.8	31.5	2.3	35.0	31.5	3.5	34.0	29.6	4.4	33.4	30.4	3.0
May.	31.0	28.4	2.6	31.1	27.9	3.3	32.1	29.5	2.5	32.3	28.6	3.7	32.8	28.3	4.5	31.5	28.3	3.2
Jun.	28.1	26.3	1.8	27.9	26.0	1.9	29.9	27.9	2.0	29.3	26.8	2.5	29.3	26.4	2.8	28.2	26.1	2.1
Jul.	28.3	26.5	1.7	27.8	26.0	1.7	30.0	28.0	1.9	29.5	27.1	2.4	29.2	26.6	2.6	28.2	26.3	2.0
Ago.	27.8	26.1	1.7	27.5	25.8	1.7	28.8	27.0	1.8	29.2	26.7	2.5	29.1	26.4	2.8	28.2	26.1	2.0
Sep.	28.7	27.0	1.7	27.3	25.7	1.6	29.1	27.4	1.7	30.4	27.8	2.6	29.2	26.5	2.7	28.8	26.7	2.1
Oct.	32.0	29.8	2.2	28.9	26.6	2.3	31.2	29.1	2.1	34.7	31.4	3.2	31.7	27.9	3.8	31.8	29.0	2.8
Nov.	28.7	26.9	1.7	26.2	24.9	1.3	27.5	26.1	1.4	31.1	28.3	2.8	28.7	26.0	2.8	28.7	26.6	2.1
Dic.	31.4	29.3	2.1	27.8	26.0	1.8	29.5	27.7	1.8	34.6	31.3	3.3	31.0	27.6	3.4	31.3	28.7	2.6
Min.	27.8	26.1	1.5	26.2	24.9	1.3	27.5	26.1	1.3	29.2	26.7	2.4	28.7	26.0	2.6	28.2	26.1	2.0
Máx.	33.4	31.4	2.6	31.9	28.9	3.3	33.8	31.5	2.5	37.3	34.1	3.7	34.0	29.6	4.5	33.4	30.8	3.2
Prom	30.4	28.4	2.0	28.4	26.3	2.0	30.2	28.4	1.9	32.6	29.6	3.0	30.8	27.4	3.4	30.4	28.0	2.4

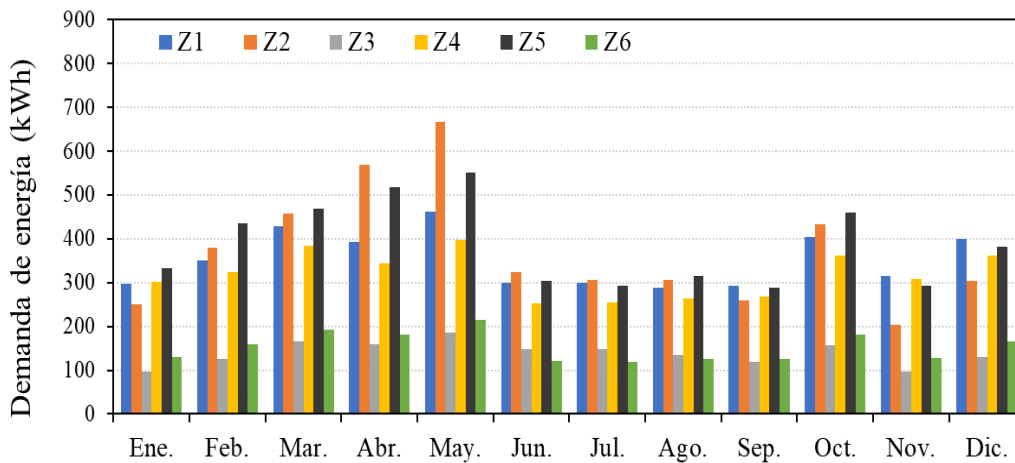


Figura 5.10 Demanda de energía para enfriamiento del techo con lámina.

Edificio con techo ventilado de teja

A continuación, en la Tabla 5.8 se muestran las temperaturas internas con AA y en EL para el edificio simulado con tejas de barro. Con este tipo de techo se alcanza una temperatura interna de hasta 37.9 °C (en la zona 4), y una mínima de 25.5 °C (en la zona 2), por lo que las fluctuaciones de temperatura del edificio están dentro de ese intervalo. Los meses de mayor consumo energético para acondicionar las zonas son abril y mayo, alcanzando poco menos de 600 kWh. Y los meses de menor consumo son de noviembre a enero, esta información se puede observar en la Figura 5.10. La Z5 es quien requiere más cargas de enfriamiento, alrededor de 4,500 kWh anuales, y la zona con menor necesidad de enfriamiento es la zona 3 con alrededor de 1,300 kWh, esta última zona es pequeña y está ubicada en la parte izquierda del edificio y recibe poca radiación en sus fachadas.

Tabla 5.8 Temperatura del aire interior con techo de teja.

Mes	Temperatura promedio mensual con techo de teja (°C)																	
	Zona 1			Zona 2			Zona 3			Zona 4			Zona 5			Zona 6		
	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.
Ene.	29.9	28.5	1.4	25.9	24.8	1.1	27.9	26.9	1.0	34.3	29.8	4.5	30.3	26.8	3.5	30.7	28.1	2.5
Feb.	32.8	30.9	1.8	28.3	26.6	1.7	31.2	29.8	1.4	37.9	32.4	5.5	33.4	28.7	4.7	34.0	30.8	3.2
Mar.	30.8	28.6	2.2	28.2	26.1	2.1	30.5	28.6	1.8	34.2	29.4	4.8	31.8	27.3	4.5	31.8	28.5	3.3
Abr.	32.4	30.1	2.3	31.1	28.6	2.5	33.1	31.2	1.9	35.2	30.9	4.4	34.3	29.5	4.8	33.7	30.5	3.2
May.	30.2	27.7	2.5	30.3	27.5	2.8	31.3	29.3	2.1	32.3	28.4	3.9	32.9	28.2	4.6	31.6	28.3	3.3
Jun.	27.4	25.9	1.5	27.1	25.5	1.6	29.2	27.5	1.7	29.3	26.5	2.9	29.3	26.3	3.0	28.3	26.1	2.2
Jul.	27.5	26.1	1.4	27.0	25.6	1.4	29.3	27.7	1.6	29.6	26.7	2.9	29.3	26.5	2.8	28.4	26.3	2.1
Ago.	27.1	25.7	1.4	26.7	25.3	1.4	28.1	26.7	1.4	29.3	26.4	2.9	29.3	26.3	3.0	28.3	26.2	2.2
Sep.	28.0	26.5	1.5	26.6	25.3	1.3	28.4	27.1	1.4	30.7	27.3	3.4	29.4	26.4	3.1	29.1	26.7	2.3
Oct.	31.3	29.3	2.0	28.1	26.2	1.9	30.5	28.8	1.7	35.2	30.3	4.9	32.1	27.7	4.5	32.3	29.1	3.2
Nov.	28.0	26.5	1.5	25.5	24.4	1.0	26.9	25.8	1.1	31.6	27.5	4.1	29.2	25.9	3.3	29.1	26.6	2.5
Dic.	30.8	28.8	2.0	27.1	25.6	1.5	28.9	27.4	1.5	35.2	30.1	5.1	31.6	27.4	4.2	31.9	28.7	3.2
Min.	27.1	25.7	1.4	25.5	24.4	1.0	26.9	25.8	1.0	29.3	26.4	2.9	29.2	25.9	2.8	28.3	26.1	2.1
Máx.	32.8	30.9	2.5	31.1	28.6	2.8	33.1	31.2	2.1	37.9	32.4	5.5	34.3	29.5	4.8	34.0	30.8	3.3
Prom	29.7	27.9	1.8	27.7	26.0	1.7	29.6	28.1	1.5	32.9	28.8	4.1	31.1	27.2	3.8	30.8	28.0	2.8

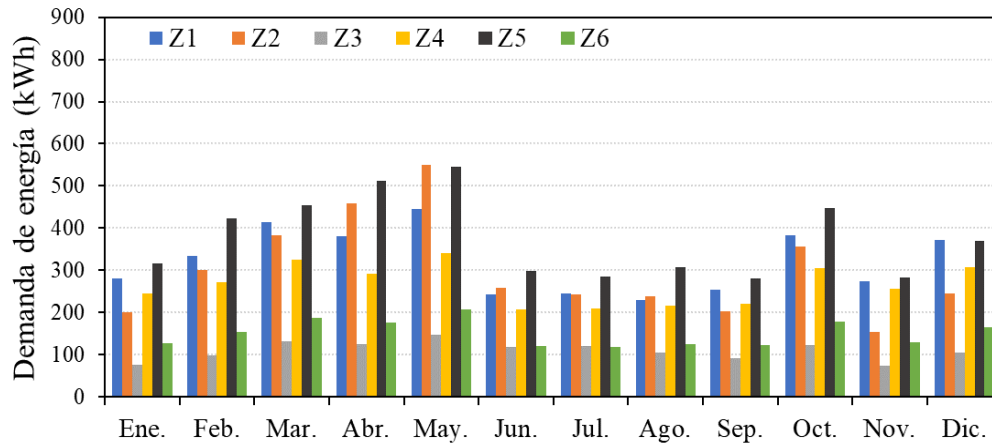


Figura 5.11 Demanda de energía para enfriamiento del techo con teja.

Edificio con techo ventilado con vegetación

Los valores promedio mensuales de la temperatura interna con y sin sistemas de enfriamiento se muestran en la Tabla 5.9. En esta configuración el techo ventilado está formado con vegetación. De acuerdo a los datos, la zona térmica con mayor temperatura a lo largo del año es la zona 4, alcanzando un promedio de 37 °C. Cuando se activa o simula el sistema de aire acondicionado las temperaturas disminuyen, presentándose una disminución de hasta 4.4 °C. En la Figura 5.11 se muestra la demanda mensual de enfriamiento, se puede apreciar que mayo es el mes que requiere mayor energía y el de menor demanda es enero. Estos datos coinciden con el comportamiento de la temperatura ambiente, pues son mayo y enero los meses con la temperatura más alta y más baja, respectivamente. En esta configuración de techo, la Z5 es quien demanda más energía para enfriar el espacio; y la menor demanda, de nuevo se presenta en la zona 3. Por otro lado, el consumo de cada una de las zonas es menor a 500 kWh la mayor parte del año.

Tabla 5.9 Temperatura del aire interior con techo con vegetación.

Mes	Temperatura promedio mensual con techo con vegetación (°C)																	
	Zona 1			Zona 2			Zona 3			Zona 4			Zona 5			Zona 6		
	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.	EL	AA	Dif.
Ene.	30.1	28.7	1.5	26.1	24.9	1.2	28.1	27.0	1.1	33.4	31.0	2.4	29.7	27.0	2.7	29.9	28.1	1.9
Feb.	32.9	31.0	1.9	28.4	26.6	1.8	31.4	29.8	1.6	37.0	34.0	2.9	32.7	29.0	3.7	33.1	30.6	2.5
Mar.	30.9	28.7	2.3	28.4	26.2	2.2	30.6	28.7	2.0	33.6	30.3	3.3	31.3	27.5	3.8	31.1	28.4	2.8
Abr.	32.6	30.3	2.4	31.4	28.6	2.8	33.4	31.3	2.1	34.7	31.4	3.3	33.9	29.5	4.3	33.1	30.2	2.9
May.	30.4	27.9	2.6	30.6	27.6	3.0	31.6	29.3	2.3	32.0	28.5	3.5	32.6	28.2	4.4	31.3	28.2	3.1
Jun.	27.6	26.0	1.6	27.4	25.6	1.7	29.4	27.6	1.8	29.0	26.6	2.4	29.1	26.3	2.8	28.0	26.0	2.0
Jul.	27.7	26.2	1.5	27.2	25.7	1.5	29.5	27.8	1.7	29.2	26.9	2.3	29.0	26.5	2.5	28.0	26.2	1.9
Ago.	27.3	25.8	1.5	27.0	25.5	1.5	28.3	26.8	1.6	28.9	26.6	2.3	29.0	26.3	2.7	28.0	26.0	1.9
Sep.	28.2	26.6	1.6	26.8	25.4	1.4	28.6	27.1	1.5	30.1	27.7	2.4	29.0	26.4	2.7	28.6	26.6	2.0
Oct.	31.4	29.3	2.1	28.3	26.2	2.1	30.7	28.8	1.8	34.3	31.3	3.1	31.5	27.8	3.7	31.5	28.9	2.6
Nov.	28.3	26.7	1.6	25.7	24.6	1.1	27.1	25.8	1.2	30.8	28.2	2.6	28.6	25.9	2.7	28.5	26.5	2.0
Dic.	31.0	29.0	2.1	27.3	25.7	1.6	29.1	27.5	1.6	34.3	31.2	3.1	30.8	27.5	3.3	31.1	28.6	2.5
Min.	27.3	25.8	1.5	25.7	24.6	1.1	27.1	25.8	1.1	28.9	26.6	2.3	28.6	25.9	2.5	28.0	26.0	1.9
Máx.	32.9	31.0	2.6	31.4	28.6	3.0	33.4	31.3	2.3	37.0	34.0	3.5	33.9	29.5	4.4	33.1	30.6	3.1
Prom.	29.9	28.0	1.9	27.9	26.0	1.8	29.8	28.1	1.7	32.3	29.5	2.8	30.6	27.3	3.3	30.2	27.9	2.3

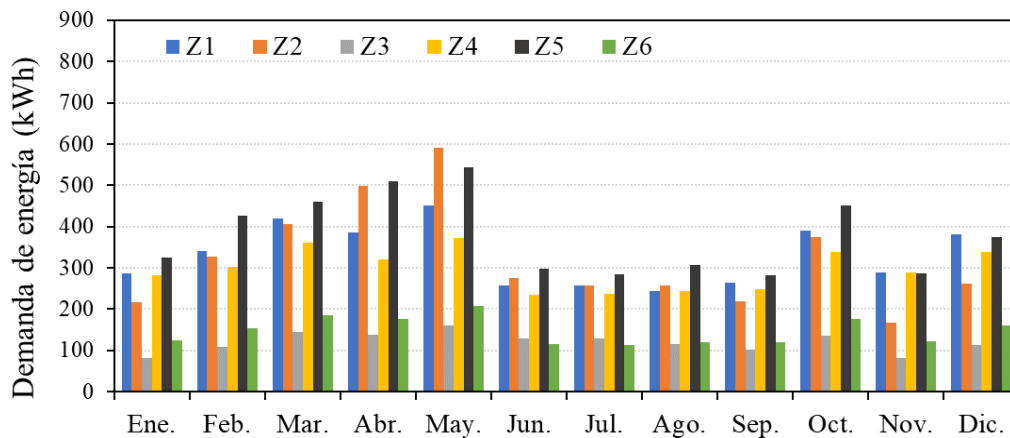


Figura 5.12 Demanda de energía para enfriamiento del techo con vegetación.

5.2.3 Demanda energética total con los diferentes tipos de techos

Es importante recordar, que los techos ventilados lograron reducir la temperatura interna a la temperatura de confort solo algunas horas del día. No se consideró sombreado en las ventanas ni ventilación, por lo que permanecen las aberturas cerradas todo el tiempo. Esto también es un factor para que la temperatura se eleve, pues al no existir ningún tipo de ventilación, el calor no es removido por el aire entrante. En la simulación se realizó esta consideración para analizar el comportamiento térmico del edificio con las menores perturbaciones posibles, pero en la vida real existen varios factores que afectan el desarrollo térmico del aire interior; por ejemplo, la apertura de puertas y ventanas, la ocupación y el uso de equipo eléctrico.

En la Figura 5.12 se aprecia la demanda energética para acondicionar las zonas del último nivel del edificio con cada configuración de techo ventilado. Se puede notar que en todos los meses el techo tradicional requiere mayor energía, seguido del techo de lámina, vegetación y teja. Este último sistema, es el techo con menor requerimiento energético en el año, logrando reducir la demanda 25.4%, respecto al tradicional. Mientras que el techo con vegetación y lámina galvanizada lograron reducir la demanda anual 21.9% y 15.7, respectivamente. El comportamiento de las cuatro configuraciones es similar, los meses de menor demanda son de junio a septiembre, esto se debe en gran medida a que son los meses con menor temperatura ambiente y con mayor humedad relativa, lo que ayuda a que disminuir la temperatura interior del edificio y en consecuencia la demanda energética. Por otro lado, la mayor demanda se presenta en abril y mayo, esto también concuerda con que, son los meses con mayor temperatura ambiente y menor humedad relativa. El techo de losa común requiere anualmente 24,521.5 kWh para satisfacer la demanda energética, el techo de lámina, vegetación y teja requieren 20,662.6 kWh, 19,144.5 kWh y 18,290.1 kWh, respectivamente. A pesar de que los techos ventilados son

insuficientes para reducir la temperatura interna a niveles de confort, si presentan un ahorro energético en las cargas térmicas, como se muestra con más detalle en la Tabla 10.

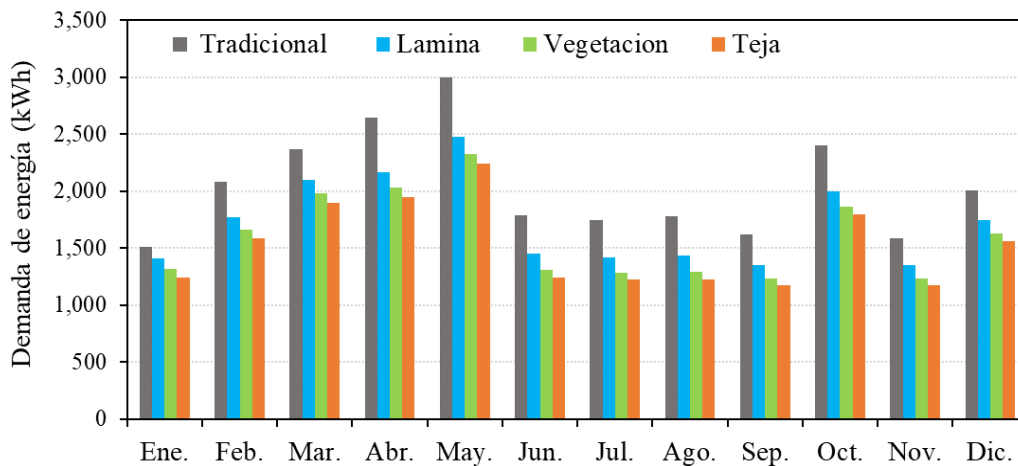


Figura 5.13 Demanda de energía para enfriamiento de cada techo.

Tabla 5.10 Cargas térmicas de refrigeración de cada techo.

Mes	Cargas térmicas de refrigeración (kWh)			
	Tradicional	Lámina	Vegetación	Teja
Ene.	1,507.5	1,408.4	1,317.1	1,241.9
Feb.	2,080.6	1,773.9	1,657.0	1,583.6
Mar.	2,367.8	2,097.8	1,976.3	1,896.1
Abr.	2,644.4	2,163.3	2,028.2	1,944.4
May.	2,998.6	2,478.5	2,328.4	2,236.7
Jun.	1,787.3	1,450.1	1,308.7	1,244.0
Jul.	1,746.0	1,420.3	1,281.0	1,221.3
Ago.	1,776.9	1,431.6	1,287.7	1,221.7
Sep.	1,622.3	1,352.2	1,234.1	1,173.6
Oct.	2,399.0	1,997.9	1,864.5	1,794.7
Nov.	1,585.8	1,345.9	1,232.8	1,170.3
Dic.	2,005.4	1,742.7	1,628.6	1,561.8
Total	24,521.5	20,662.6	19,144.5	18,290.1
Promedio	2,043.5	1,721.9	1,595.4	1,524.2
Reducción (%)	-	15.7	21.9	25.4

5.2.4 Conclusiones de la simulación con el sistema de enfriamiento

Techo tradicional

- La zona con mayor temperatura interna es la Z4
- La zona con menor temperatura interna es la Z2
- La zona con mayor demanda energética es la Z1 y Z2
- La zona con menor demanda energética es la Z3

Techos ventilados

- La zona con mayor temperatura interna es la Z4
- La zona con menor temperatura interna es la Z2
- La zona con mayor demanda energética es la Z5
- La zona con menor demanda energética es la Z3 y Z6

Generales

- En todos los meses el techo tradicional requiere mayor energía para enfriamiento, seguido del techo de lámina, vegetación y teja.
- El techo de losa común requiere anualmente 24,521.5 kWh para satisfacer la demanda energética, el techo de lámina, vegetación y teja requieren 20,662.6 kWh, 19,144.5 kWh y 18,290.1 kWh, respectivamente.
- Los meses de mayor demanda son abril y mayo, mientras que los de menor demanda son de junio a septiembre.
- Energéticamente, el techo de teja logró reducir la demanda para refrigeración 25.4%, el de vegetación 21.9% y el de lámina 15.7%, respecto al techo tradicional.

5.3 Análisis costo beneficio

Antes de realizar una inversión se requiere hacer un estudio económico para saber si el proyecto es conveniente para el usuario. El análisis costo beneficio (ACB) permite identificar, cuantificar y valorar los costos y beneficios del proyecto durante la etapa de inversión, para determinar la conveniencia de realizar o no el proyecto. En este sentido, en la presente sección se utiliza el ACB para comparar tres proyectos alternativos que compiten entre sí, para ello se comparan los costos y los beneficios esperados de cada uno, en un horizonte de tiempo y considerando la variabilidad del dinero en el tiempo.

Las altas temperaturas en la edificación pueden provocar en los usuarios fatiga que podría reflejarse en baja productividad y el aumento de costos por la ventilación. La alternativa que se propuso para disminuir la temperatura interna del edificio es por medio de techos ventilados, los cuales están formados por láminas de acero galvanizado, tejas de barro y vegetación como techo secundario, colocados a una altura de 15 cm de la losa del edificio.

Los beneficios que se buscan con los sistemas pasivos son el ahorro de energía eléctrica, aumento del valor de la propiedad y la longevidad del techo de la edificación. Este último beneficio se obtiene gracias a la acción protectora del techo ventilado al bloquear la radiación solar y la lluvia ácida, y al reducir las fluctuaciones de temperatura de la losa. Respecto al techo ventilado verde, este puede reducir el CO₂ del ambiente a través de las plantas y pueden proporcionar un hábitat para la fauna. Las especies de animales que son atraídas por la vegetación dependen del tipo de plantas, además de la presencia de flora y fauna de los alrededores. Pero en general, se muestra que los techos verdes albergan una variedad de insectos y aves (Claus y Rousseau, 2012).

La construcción de los techos ventilados cumple con tres aspectos importantes a la hora de llevar a cabo un proyecto:

- Factibilidad técnica, su construcción es común dentro de cualquier obra de ingeniería y no requiere de tecnología altamente sofisticada, por lo que la obra se puede desarrollar sin percances técnicos.
- Factibilidad legal, no se requieren de permisos especiales para su desarrollo.
- Factibilidad ambiental, su construcción no afecta directamente el medio ambiente.

Para la evaluación de los proyectos se utilizaron cuatro indicadores de rentabilidad, que permiten explorar cuál de los proyectos alternativos ofrece más potencial para el ahorro de energía.

- **Valor Actual Neto (VAN)**, mide el desempeño de un proyecto en un horizonte temporal, teniendo en cuenta todos los gastos e ingresos en el momento de su desempeño y asignando un valor temporal en ese momento mediante la aplicación de una tasa de descuento.
- **Tasa Interna de Retorno (TIR)**, es la tasa porcentual anual de retorno de la inversión, permite comparar el valor actual de los gastos con los ingresos que se han proyectado para el futuro, es decir, el porcentaje de pérdidas o beneficios que supondrá cualquier inversión que llevemos a cabo.
- **Índice de Rentabilidad (IR)**, es una relación entre los beneficios y los costos del proyecto.
- **Periodo de reembolso o recuperación (PR)**, indica el número de años que se requieren para recuperar la inversión, el escenario más favorable se da cuando el PR es más bajo.

La fórmula para obtener el costo actual neto es la siguiente:

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \quad (5.1)$$

Donde B_t es el valor (\$) de los beneficios recibidos en el tiempo t (años 1, 2, ...), C_t es el valor (\$) de los costos recibidos en el tiempo t (años), i es la tasa de descuento (%), n es el horizonte de tiempo del proyecto en años. Mientras que la TIR puede definirse como la tasa de descuento que hace que el VAN sea igual a cero.

$$TIR = VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} = 0 \quad (5.2)$$

Una $TIR > i$ indica que el proyecto es aceptable. Pues la tasa de rendimiento interno es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida en la inversión. $TIR < i$ indica que el proyecto debe rechazarse, pues el rendimiento interno es menor que la tasa mínima de rentabilidad, es decir, cuesta más financiar el proyecto que los beneficios que se obtendrán a largo plazo por la inversión. Una $TIR = i$ indica que el proyecto puede o no realizarse, ya que no se gana ni se pierde. En este caso se valora si se pueden obtener otro tipo de beneficios con la realización del proyecto.

Para el ACB se incluyen costos recopilados de empresas de venta de materiales e instalación de techos, de herreros, de jardineros y costos de productos de venta local y digital. En la mayoría de los materiales necesarios para la construcción de los techos, el costo varía dependiendo del lugar de venta y el número de productos a adquirir. Por lo que se toma un promedio de los valores encontrados para calcular los costos finales de los proyectos. Considerando una inversión privada la tasa de descuento asumida es del

10% (Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe, 2022) y para el horizonte de tiempo se toman 15 años, tiempo suficiente para saber si un proyecto es rentable o no (Preciado-Pérez y Fotios, 2017).

El caso base (edificio sin modificaciones) no presenta costos ni beneficios de construcción, solo el consumo de energía por aire acondicionado, por lo tanto, su VAN se asume igual a cero. Para el techo ventilado con vegetación, se considera la enredadera *cissus antártica*, que de acuerdo a las características de la vegetación y considerando las condiciones climáticas de Cuernavaca, el mantenimiento que requiere es mínimo. Se requiere de riego cada dos días, el cual se realiza con 1.5 litros de agua por maceta, abono y poda anual, además de remplazar el 5% de enredaderas al año (Perini y Rosaco, 2013). También se deben remplazar las tuberías de agua de los sistemas de riego automático cada 10 años debido a la cristalización de sales y al deterioro del plástico. Por otro lado, los techos con lámina y tejas no requieren mantenimiento por la durabilidad de sus materiales, sin embargo, sus costos iniciales son más elevados. En la Tabla 5.11 se aprecian los costos iniciales y de mantenimiento de cada una de las alternativas.

Tabla 5.11 Costos de los techos ventilados.

Tipo de techo	Componentes principales	Costo inicial (\$)	Costo O&M (\$/año)	Costo unitario ^a (\$/m ² año)
Verde	Vegetación			
	Macetas			
	Sustrato			
	Soportes modulares	76,960.8	3084.0	248.3
	Sistema de riego			
Lámina	Sistema de soporte			
	Láminas	150,500.0	0	485.5
Teja	Sistema de soporte			
	Tejas	185,925.0	0	599.8

^a Área a cubrir 310 m².

Existen dos métodos para evaluar un proyecto, uno *estático* que no considera el valor del dinero en el tiempo y otro *dinámico* que si considera el valor del dinero en el tiempo. En el método estático se considera el ahorro monetario proveniente de la disminución de energía eléctrica para enfriamiento, provocado por el uso de los techos ventilados. Para obtener el costo de la energía eléctrica, las cargas térmicas que se obtuvieron con la simulación del edificio se multiplican por el costo del kWh de las tarifas publicadas por la Comisión Federal de Electricidad. El edificio Cenidet campus mecánica cuenta con la tarifa general GDBT de gran demanda mayor a 25 kW/mes, la cual se encuentra en la Tabla 5.12, y los costos están divididos en dos años porque se tomaron los costos más recientes al momento de ser calculados. En seguida se presentan los dos métodos para evaluar un proyecto.

Tabla 5.12 Costos mensuales de electricidad.

Año	Mes	\$/kWh
2022	Enero	1.386
	Febrero	1.397
	Marzo	1.397
	Abril	1.433
	Mayo	1.461
	Junio	1.421
2021	Julio	1.379
	Agosto	1.377
	Septiembre	1.350
	Octubre	1.346
	Noviembre	1.357
	Diciembre	1.372

Método estático

Una vez que se tienen los costos de electricidad por el uso de aire acondicionado en cada uno de los techos ventilados se obtiene el ahorro monetario logrado y el periodo de recuperación. En la Tabla 5.13 se aprecia que el techo con vegetación necesita de 17.4 años para recuperar la inversión, seguido del techo con teja y lámina con 21.4 y 27.9 años, respectivamente. A pesar de que el techo con teja requiere una mayor inversión, el ahorro que se produce es mayor, lo que permite que la inversión se recupere en menor tiempo, respecto al techo de lámina. La ventaja que tienen los techos de teja y lámina es el nulo mantenimiento, mientras que el techo con vegetación requiere un costo extra por el mantenimiento que incluye el riego, la poda, el abono y el cambio de enredaderas enfermas o secas por enredaderas nuevas.

Tabla 5.13 Periodo de recuperación de la inversión.

Techos	Consumo eléctrico (\$/año)	Ahorro (\$/año)	Ahorro (%)	Periodo de recuperación (años)
Tradicional	34,190.9	-	-	
Vegetación	29,775.8	4,415.1	12.9	17.4
Teja	25,501.6	8,689.2	25.4	21.4
Lámina	28,804.4	5,386.4	15.7	27.9

Método dinámico

El criterio para aceptar o no un proyecto, es el valor actual neto positivo o negativo. Si el VAN es mayor que cero, indica que el valor de los flujos traídos a valor presente, superan la inversión inicial, y por lo tanto el proyecto genera ganancias que superan el costo de capital y el proyecto se podría aceptar. Si el VAN da un valor negativo, indica que el valor presente de los flujos de efectivo no logra superar la inversión inicial, y por lo tanto es un proyecto que no va a generar valor suficiente para el inversionista, lo que indica que no va a generar un valor que exceda el costo de capital, en consecuencia, no valdría la pena realizar ese proyecto. De acuerdo a la Tabla 5.14, las tres alternativas presentan un VAN negativo, esto indica que no son proyectos rentables en el horizonte de tiempo de 15 años, ya que los beneficios monetarios son insuficientes para cubrir la inversión, esto porque el valor del dinero en el tiempo va disminuyendo al pasar los años.

Un proyecto puede aceptarse cuando la TIR es mayor a la tasa de descuento (en este análisis del 10%), y rechazarse en el caso contrario. Las tres opciones de techo ventilado presentan una TIR negativa, esto indica que los beneficios son menores que la inversión en el horizonte de tiempo de 15 años. Finalmente, el índice de rentabilidad, proporciona una idea general del rendimiento del proyecto, entre más alto sea, indica un mayor funcionamiento. En este caso los techos ventilados proporcionan un índice menor a 1, lo que confirma que no son alternativas viables. La razón de estos resultados es que se

generan pocos beneficios económicos por el ahorro de energía eléctrica, estos son menores a \$10,000 pesos anuales, y la inversión para los techos ventilados es muy alta, tanto que en 15 años no se recuperaría lo invertido. Para que los techos sean rentables y se recupere la inversión en el horizonte de tiempo estimado, el ahorro económico anual tendría que ser igual o mayor a \$20,000 para el techo con lámina galvanizada, \$13,500 para el techo con vegetación y \$25,000 para el techo con tejas.

Tabla 5.14 Indicadores de rentabilidad económica de los sistemas de techos ventilados.

Tipo de techo	Valor actual neto (VAN) (\$)	Tasa interna de retorno (TIR) (%)	Índice de rentabilidad (IR)	Periodo de recuperación (años)
Lámina	-109,530.3	- 6.93%	0.27	No se logra recuperar la inversión
Vegetación	-43,379.57	-1.82%	0.44	
Teja	-119,833.88	- 4.14%	0.36	

Para calcular las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad en cada una de las configuraciones de techo ventilado, se usa el factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional correspondiente al año 2022, que es 0.435 tCO₂e/MWh (Comisión Reguladora de Energía, 2023). En la Tabla 5.15 se observa que el mayor consumo de electricidad se presenta en el techo tradicional y, en consecuencia, este techo emite más CO₂ a la atmósfera, con 10.7 tCO₂e/año. Por el contrario, el techo con teja emite el menor valor, con 8 tCO₂e/año. Estos valores presentan una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero de 25.4% para el techo de teja, 21.9% para el techo con vegetación y 15.7% para el techo de lámina, respecto al techo tradicional.

Tabla 5.15 Emisiones de CO₂ con cada configuración de techo.

Tipo de techo	Consumo eléctrico (MWh/año)	Emisiones (tCO ₂ e/año)	Reducción de emisiones (%)
Tradicional	24.5	10.7	-
Lámina	20.7	9.0	15.7
Vegetación	19.1	8.3	21.9
Teja	18.3	8.0	25.4

5.3.1 A Conclusiones del análisis costo beneficio

- El techo que requiere una inversión mayor es el techo ventilado con teja, seguido del techo de lámina y el techo verde.
- El análisis económico demostró que los techos ventilados no son inversiones rentables en un periodo de recuperación de 15 años.
- Monetariamente, el techo con teja logró un ahorro de 25.4%, el techo con lámina un 15.7% y el techo con vegetación 12.9%, respecto al techo tradicional.
- El techo tradicional presentó las mayores emisiones con 10.7 tCO₂e/año, y el techo de teja las menores emisiones con 8 tCO₂e/año.
- El techo de teja logró reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta un 25.4%.

Capítulo 6

Conclusiones y recomendaciones

Se analizó el comportamiento térmico, energético, económico y ambiental de un edificio no residencial con techo tradicional y tres tipos de techo ventilado: lámina galvanizada, teja de barro y vegetación. Para ello, se realizaron simulaciones en el software DesignBuilder en evolución libre y con un sistema de refrigeración, con las condiciones climáticas de un clima cálido-subhúmedo. Para el análisis se presentaron las temperaturas promedio mensual al interior de la edificación y en la superficie exterior de la losa, así como las cargas térmicas de enfriamiento necesarias para mantener la temperatura de confort. De acuerdo con los resultados de las etapas experimentales y de la simulación del edificio se concluye lo siguiente:

6.1 Conclusiones

Parte experimental

Etapa I: Vegetación puesta a prueba

- La vegetación más densa que logró bloquear un mayor índice de radiación y proporcionar más sombreado al techo son la especie *Thunbergia laurifolia* y *Cissus Antártica*, posicionadas sobre las cubiertas C1 y C2.
- La C2 presentó una reducción promedio de la radiación solar del 31% respecto al techo tradicional, lo que equivale a la reducción de 6 °C en la superficie del techo.
- La vegetación seleccionada para usarse en el módulo experimental es *Cissus antártica*.

Etapa II: Construcción de módulos de prueba

- El módulo con techo desnudo (losa común) presenta la temperatura más alta en el interior del módulo y en la losa, en todo el periodo de análisis.
- El techo ventilado que reduce mayormente la temperatura interna respecto al módulo tradicional es el de teja, con una máxima de 10.9 °C y en promedio 3.2 °C.
- La vegetación no tiene un crecimiento denso y uniforme a lo largo de los meses, está propensa a enfermedades y los fuertes vientos pueden mover las ramas de su sitio provocando huecos entre las hojas que dejan pasar directamente la radiación solar al techo.

Etapa III: Validación/calibración del modelo energético/físico en el software

- El error máximo MAE calculado fue de 1.7 °C y el aceptado es de 2 °C.
- En todos los puntos validados el error R² es superior al 75% aceptable.

- La precisión más alta se encontró en la comparación de la temperatura interior con un 99.4% de precisión entre los datos medidos y simulados con el índice R2.

Parte teórica (simulaciones)

Edificio en evolución libre

- Los resultados simulados del edificio con los diferentes techos ventilados concuerdan con los datos experimentales, en ambos casos resultó que la mejor opción para disminuir la temperatura interior es usar un techo ventilado de teja.
- El techo con losa tradicional presenta las temperaturas más altas en todos los puntos, y el techo con teja presenta las temperaturas más bajas.
- El techo con losa tradicional, presenta la temperatura más alta en el aire interior y en la superficie exterior del techo, con 32.2 °C y 33.8 °C, respectivamente.
- El techo ventilado con teja de barro, logró disminuir mayormente la temperatura del aire interior con 1.3 °C en promedio; y la temperatura de la superficie exterior de la losa con 7.4 °C, respecto al tradicional.
- En el análisis semanal las temperaturas interiores superan los 40 °C, y el techo de teja reduce hasta 3.3 °C y en promedio 1.2 °C, comparándolo con el tradicional.

Edificio con un sistema de enfriamiento

- En todos los meses el techo tradicional requiere mayor energía para enfriamiento, seguido del techo de lámina, vegetación y teja.
- El techo de losa común requiere anualmente 24,521.5 kWh para satisfacer la demanda energética, el techo de lámina, vegetación y teja requieren 20,662.6 kWh, 19,144.5 kWh y 18,290.1 kWh, respectivamente.

- Los meses de mayor demanda son abril y mayo, mientras que los de menor demanda son de junio a septiembre.
- Energéticamente, el techo de teja logró reducir la demanda 25.4%, el de vegetación 21.9% y el de lámina 15.7%, respecto al techo tradicional.

Análisis costo beneficio

- El análisis económico demostró que los techos ventilados no son inversiones rentables en un periodo de recuperación de 15 años.
- Monetariamente, el techo con teja logró un ahorro de 25.4%, el techo con lámina un 15.7% y el techo con vegetación 12.9%, respecto al techo tradicional.
- El techo tradicional presentó las mayores emisiones con 10.7 tCO_{2e}/año, y el techo de teja las menores emisiones con 8 tCO_{2e}/año, lo que equivale a una reducción del 25.4%.

6.2 Recomendaciones

A continuación, se enlista una serie de recomendaciones para trabajos futuros y dar continuidad al presente trabajo de investigación:

- Analizar experimentalmente el flujo de aire dentro del canal ventilado.
- Variar el espesor del canal de aire en el techo ventilado-verde.
- Realizar el estudio para otros climas de la república mexicana y para otros años
- Adicionar al techo secundario (ventilado) un recubrimiento reflectivo.
- Realizar las simulaciones del edificio, considerando ocupación, ganancias internas debidas a equipo eléctrico y luminarias.
- Asegurar un sombreado completo del techo.

Referencias bibliográficas

Banionis K., Monstvilas E., Stankevičius V., Bliudžius R., Miškinis K. Impact of heat reflective coatings on heat flows through the ventilated roof with steel coatings. *Journal of Civil Engineering and Management* 18 (2012) 505–511.

Beltrán B. Modelación computacional de techos ventilados para climas de la república mexicana. (tesis de maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) (2018) Cuernavaca, Morelos.

Berardi U., GhaffarianHoseini A., GhaffarianHoseini A. State of the art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy* 115 (2014) 411-428.

Besir AB., Cuce E. Green roofs and facades: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018) 915-939.

Bianco V., Diana A., Manca O., Nardini S. Numerical investigation of an inclined rectangular cavity for ventilated roofs applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 6 (2018) 426–435.

Biwole PH., Woloszyn M., Pompeo C. Heat transfers in a double-skin roof ventilated by natural convection in summer time. *Energy and Buildings* 40 (2008) 1487–1497.

Cabello-Pasini A., Macías-Carranza V. Optical properties of grapevine leaves: reflectance, transmittance, absorptance and chlorophyll concentration. *Agrociencia* 45 (2011) 943-957.

Carbajal-Avila J., Rodríguez-Rosales A., Avila-Caballero LP., Rodríguez-Herrera A., López-Velasco R., Hernández-Cocoletzi H. Propiedades ópticas de enredaderas en fachadas vegetadas. *Revista Iberoamericana de Ciencias* 3 (2016) 17-29.

Cascone S., Coma J., Gagliano A., Pérez G. The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment* 147 (2019) 337-355.

Chang PC., Chiang CM., Lai CM. Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). *Energy and Buildings* 40 (2008) 140–147.

Chen X., Wang L., Liu Z., Qin Y., Bao T. Lowering emissivity of concrete roof tile's underside cuts down heat entry to the building. *Advances in Materials Science and Engineering* (2019) 1-8.

Ciampi M., Leccese F., Tuoni G. Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. *Solar Energy* 79 (2005) 183–192.

Claus K., Rousseau S. Public versus private incentives to invest in green roofs: A cost benefit analysis for Flanders. *Urban Forestry & Urban Greening* 11 (2012) 417–425.

Coimbra MC., Russo Chagas RC., Pádua Vilela MS., Fonseca Castro AH. Growth, morphology and bioactive phenolic compounds production in *Pyrostegia venusta* calli. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 18 (2019) 1-8.

Coma J., Pérez G., De Gracia A., Burés S., Urrestarazu M. Vertical greenery systems for energy savings in buildings: a comparative study between green wall and green facades. *Building and Environment* 111 (2017) 228–237.

Coma J., Pérez G., Solé C., Castell A., Cabeza LF. New green facades as passive systems for energy savings on buildings. *Energy Procedia* 57 (2014) 1851-1859.

Comisión Nacional para el uso Eficiente de la Energía (CONUEE). Eficiencia energética en edificaciones, (2016). Disponible en: <https://www.gob.mx/conuee> (Accedido 25/Mayo/2019).

Comisión Reguladora de Energía (CRE). Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2022, (2023). Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/806468/4_-Aviso_FE_2022__1_.pdf (Accedido 10/Mayo/2023).

Contreras M., Serrano-Medrano M., Masera O. Patrones de consumo energético en el sector residencial de México: un análisis desde la perspectiva de usos finales. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt), Plataforma Nacional Energía Ambiente y Sociedad (Planeas), Programa Nacional Estratégico de Energía y Cambio Climático (Pronaces-ecc), (2022). Disponible en: https://conahcyt.mx/wp-content/uploads/pronaces/micrositios/energia_y_cambio_climatico/energia/cuadernos_t

ematicos/Cuaderno_Tematico_I_Pronaces_ECC_ISBN_final.pdf (Accedido 23/Junio/2023).

Corporación de Desarrollo Tecnológico. Compendio técnico de materiales: cubiertas y techumbres, (2011). Disponible en:
http://descargas.coreduc.cl/15_compendio_cubiertas_y_techumbre.pdf (Accedido 07/Abril/2020).

D’Orazio M., Di Perna C., Principi P., Stazi A. Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance. *Energy and Buildings* 40 (2008) 911–916.

Dahanayake KC., Chow CL., Hou GL. Selection of suitable plant species for energy efficient vertical greenery system (VGS). *Energy Procedia* 142 (2017) 2473-2478.

Dimoudi A., Androutsopoulos A., Lykoudis S. Summer performance of a ventilated roof component. *Energy and Buildings* 38 (2006) 610–617.

Fernandez-Cañero R., Emilsson T., Fernandez-Barba C., Herrera Machuca MÁ. Green roof systems: A study of public attitudes and preferences in southern Spain. *Journal of Environmental Management* 128 (2013) 106-115.

Gagliano A., Detommaso M., Nocera F., Evola G. A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment* 90 (2015) 71-81.

Gagliano A., Patania F., Nocera F., Ferlito A., Galesi A. Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings* 49 (2012) 611–618.

Gastines M., Pattinia AE. Window energy efficiency in Argentina-determining factors and energy savings strategies. *Journal of Cleaner Production* 247 (2020) 119104.

Godoy Rangel C., Rivera-Solorio CI., Gijón-Rivera M., Mousavi S. The effect on thermal comfort and heat transfer in naturally ventilated roofs with PCM in a semi-arid climate: An experimental research. *Energy and Buildings* 274 (2022) 112453.

Gullbrekken L., Kvande T., Time B. Ventilated wooden roofs: Influence of local weather conditions-measurements. *Energy Procedia* 132 (2017) 777–782.

Guyot D., Giraud F., Simon F., Corgier D., Marvillet C., Tremeac B. Building energy model calibration: A detailed case study using sub-hourly measured data. *Energy & Buildings* 223 (2020) 110189.

Hansen T., Moeller EB. Hygrothermal performance of cold ventilated attics above different horizontal ceiling constructions–Field survey. *Building and Environment* 165 (2019) 106380.

Hansen T., Moller EB. Field measurement of moisture variation in cold ventilated attics with different ceiling constructions. *Energy Procedia* 132 (2017) 801–806.

Harden G J. National Herbarium of NSW, Royal Botanic Garden, PlantNET. *Cissus antarctica* Vent. (1992). Disponible en: <https://plantnet.rbgsyd.nsw.gov.au/cgi->

bin/NSWfl.pl?page=nswfl&lvl=sp&name=Cissus~antarctica (Accedido 12/Noviembre/2022).

Hernández Gómez VH. y Morrillón D. Analytical model for double skin roofs. *Applied Thermal Engineering* 60 (2013) 218–224.

Hirunlabh J., Wachirapuwadon S., Pratinthong N., Khedar J. New configurations of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environment* 36 (2001) 383–391.

Hou M., Kong X., Li H., Yang H., Chen W. Experimental study on the thermal performance of composite phase change ventilated roof. *Journal of Energy Storage* 33 (2021) 102060.

International Energy Agency (IEA). *Key World Energy Statistics 2021*, (2021). Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/52f66a88-0b63-4ad2-94a5-29d36e864b82/KeyWorldEnergyStatistics2021.pdf> (Accedido 25/Mayo/2019).

Jin C., Bai X., Luo T., Zou M. Effects of green roofs' variations on the regional thermal environment using measurements and simulations in Chongqing, China. *Urban Forestry & Urban Greening* 29 (2018) 223-237.

Kharrufa SN., Adil Y. Upgrading the building envelope to reduce cooling loads. *Energy and Buildings* 55 (2012) 389–396.

Kovac M., Vojtus J. Analysis of air velocity, moisture and thermal regime in an air gap of a double-shell roof. *Energy Procedia* 78 (2015) 759–764.

Lai, CM., Huang, JY., Chiou JS. Optimal spacing for double-skin roofs. *Building and Environment*. 43 (2008) 1749–1754.

Leccese F., Salvadori G., Barlit M. Ventilated flat roofs: A simplified model to assess their hygrothermal behavior. *Journal of Building Engineering* 22 (2019) 12–21.

Lee S., Park SH., Yeo MS., Kim KW. An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment* 44 (2009) 1431–1439.

Levinson R., Akbari H., Reilly JC. Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings. *Building and Environment* 42 (2007) 2591–2605.

Li D., Zheng Y., Liu C., Qi H., Liu X. Numerical analysis on thermal performance of a PCM-filled double glazing roof. *Energy and Buildings* 22 (2016) 86–93.

Li H., Li J., Xi C., Chen W., Kong X. Experimental and numerical study on the thermal performance of ventilated roof composed with multiple phase change material (VR-MPCM). *Energy Conversion and Management* 213 (2020) 112836.

Liberati P., Spiga M., Zappavigna P. Optimization of ventilated roofs for livestock housing. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 36 (2009) 432–437.

Lima Téllez TG. Estudio transitorio de un techo ventilado para condiciones climáticas de México. (tesis de maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica). Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET). (2019) Cuernavaca, Morelos.

Manso M., Castro-Gomes J. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015) 863–871.

May Tzuc O., Hernández-Pérez I., Macias-Melo EV., Bassam A., Xamán J., Cruz B. Multi gene genetic programming for predicting the heat gain of flat naturally ventilated roof using data from outdoor environmental monitoring. *Measurement*. 138 (2019) 106–117.

Medl A., Stangl R., Florineth F. Vertical greening systems: A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment* 125 (2017) 227-239.

Ming Lai C., Huang JY., Chiou JS. Optimal spacing for double-skin roofs. *Building and Environment* 43 (2008) 1749–1754.

Mirnezhad M., Aminudin AMR., Yeap KS. Thermal Performance and Temperature Mitigation towards. Application of Green Roof in Tropical Climate. *Chemical engineering transactions* 56 (2017) 397-402.

National Ready Mixed Concrete Association, El concreto en la práctica. (2020) Disponible en: <https://www.nrmca.org/wp-content/uploads/2020/04/CIP36es.pdf> (Accedido 15/Abril/2019).

Nicol F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings* 36 (2004) 628–637.

Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. Envolverte de edificios para uso habitacional. *Diario Oficial de la Federación* (2017).

Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe. Tasa social de descuento (TSD) de México (2022), Disponible en: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/marcos-regulatorios/tasa-social-de-descuento-tsd-de-mexico> (Accedido 03/Abril/2021).

Omar AI., Virgone J., Vergnault E., David D., Idriss AI. Energy saving potential with a double-skin roof ventilated by natural convection in Djibouti. *Energy Procedia* 140 (2017) 361–373.

Ottelé M., Perini K., Fraaij ALA., Haas EM., Raiteri R. Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems. *Energy and Buildings* 43 (2011) 3419-3429.

Owens Corning, Foamular. (2016), Disponible en: <https://owenscorning.com.mx/wp-content/uploads/2016/05/foamular.pdf> (Accedido 10/Julio/2020).

Pachano JE., Fernández Bandera C. Multi-step building energy model calibration process based on measured data. *Energy & Buildings*. 252 (2021) 111380.

Patania F., Gagliano A., Nocera F., Ferlito A., Galesi A. Energy Analysis of Ventilated Roof. *Smart Innovation, Systems and Technologies* 7 (2011) 15–23.

Paz Pellat F., Casiano Domínguez M., Zarco Hidalgo A., Bolaños González M. Estimation of foliar optical properties from vegetation using equivalent radiative media and n-parametric spaces. *Terra latino americana* 31 (2013) 119-134.

Peck SW., Callaghan C. Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canadá. (1999) 1-78.

Perini K., Rosasco P. Coste benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment* 70 (2013) 110-121.

Preciado-Pérez OA., Fotios S. Comprehensive cost-benefit analysis of energy efficiency in social housing. Case study: Northwest México. *Energy and Buildings* 152 (2017) 279-289.

Qin Y., Zhang M., Hiller JE. Theoretical and experimental studies on the daily accumulative heat gain from cool roofs. *Energy* 129 (2017) 138-147.

Raji B., Tenpierik MJ., Van den Dobbelen A. The impact of greening systems on building energy performance: a literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 45 (2015) 610-623.

Reyes R., Bustamante W., Gironás J., Pastén PA., Rojas V., Suárez F., Vera S., Victorero F., Bonilla CA. Effect of substrate depth and roof layers on green roof temperature and water requirements in a semi-arid climate. *Ecological Engineering* 97 (2016) 624–632.

Sailor DJ. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings* 40 (2008) 1466-1478.

Sánchez-Reséndiz JA., Ruiz-García L., Olivieri F., Ventura-Ramos Jr E. Experimental assessment of the thermal behavior of a living wall system in semi-arid environments of central México. *Energy & Buildings* 174 (2018) 31–43.

Secretaría de Energía (SENER). Balance Nacional de Energía 2021, (2022). Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/805509/BNE-2021.pdf> (Accedido 22/Junio/2023).

Shen L., Zhao Q., Li Z., Zhao J. Sustainable Building Envelopes (Ecobuildings, Retrofit, Performance Gap) Thermal performance of double-layer black tile roof in winter. *Energy Procedia* 122 (2017) 247–252.

Smith KR., Roebber PJ. Green roof mitigation potential for a proxy future climate scenario in Chicago, Illinois. *J. Appl. Meteorol. Climatol* 50 (2011) 507–522.

Šuklje T., Hamdy M., Arkar C., Hensen JLM., Medved S. An inverse modeling approach for the thermal response modeling of green façades. *Applied Energy* 235 (2019) 1447-1456.

Sultana KW., Chatterjee S., Roy A., Chandra I. An Overview on Ethnopharmacological and Phytochemical properties of *Thunbergia* sp. *Medicinal & Aromatic Plants*. 4 (2015) 2-6.

Susanti L., Homma H., Matsumoto H. A naturally ventilated cavity roof as potential benefits for improving thermal environment and cooling load of a factory building. *Energy and Buildings* 43 (2011) 211–218.

Tong S., Li H. An efficient model development and experimental study for the heat transfer in naturally ventilated inclined roofs. *Building and Environment* 81 (2014) 296–308.

Tong S., Li H., Zingre KT., Wan MP., Chang VWC., Wong SK., et al. Thermal performance of concrete-based roofs in tropical climate. *Energy and Buildings* 76 (2014). 392–401.

Universidad de Málaga, *Jasminum mesnyi*. (2005). Disponible en: <https://jardinbotanico.uma.es/jb-trp-08/> (Accedido 12/Noviembre/2022).

Vijayaraghavan K. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 57 (2016) 740-752.

Vox G., Blanco I., Schettini E. Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment* 129 (2018) 154-166.

Wong NH., Li S. A study of the effectiveness of passive climate control in naturally ventilated residential buildings in Singapore. *Building and Environment* 42 (2007) 1395–1405.

Wood Panel Industries Federation, TRADA Technology Ltd, National Panel Products Division. Panel Guide, Version 4 (2014). Disponible en: http://wpif.org.uk/uploads/PanelGuide/PanelGuide_2014_Annex2B.pdf (Accedido 10/Julio/2020).

Yew MC., Ramli Sulong NH., Chong WT., Poh SC., Ang BC., Tan KH. Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction. *Energy Conversion and Management* 75 (2013) 241–248.

Zhang T., Tana Y., Yangb H., Zhang X. The application of air layers in building envelopes: a review. *Applied Energy* 165 (2016) 707-734.

Zheng X., Kong F., Yin H., Middel A., Liu H., Wang D. et al. Outdoor thermal performance of green roofs across multiple time scales: A case study in subtropical China. *Sustainable Cities and Society* 70 (2021) 102909.

Zingre KT., Wan MP., Wong SK., Toh WBT., Yen I. Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate Energy 82 (2015) 813-826.

Zingre KT., Yang EH., Wan MP. Dynamic thermal performance of inclined double-skin roof: Modeling and experimental investigation. Energy 133 (2017) 900–912.

Apéndice

A. Clasificación de los techos ventilados

B. Fichas bibliográficas de los artículos revisados.

C. Planos del edificio Unidad Académica 1 de Cenidet.

D. Publicaciones

A. Clasificación de los techos ventilados

Tabla A1. Techos ventilados planos.

Autor y año	País	Estudio	Método/ Software	Edificación	Techo secundario	Canal (cm)
Dimoudi et al. (2006)	Grecia	E	-	Vivienda	Losa prefabricada	6, 8
Wong y Li (2007)	Singapur	T-E	TAS	Edificio: 14 niveles	Losa de hormigón	30
Kharrufa y Adil (2012)	Iraq	T-E	Ecotec	Prototipo	Espuma de poliestireno	30
Tong et al. (2014)	Singapur	T-E	Matlab	Edificio: 12 niveles	Ferrocemento	22
Kovac y Vojtus (2015)	Eslovaquia	T	Ansys	Vivienda	Concreto con impermeabilizante	15
Zingre et al. (2015)	Singapur	T-E	Método de aproximación espectral	Edificio: 12 niveles	Ferrocemento y pintura fría	22
Beltrán (2018)	México	T	Volumen finito	Prototipo	Lámina galvanizada	10
Chen et al. (2019)	China	E	-	Prototipo	Losas de concreto	7.5
Leccese et al. (2019)	Italia	T	Código propio	Vivienda	Lámina galvanizada	15
Lima (2019)	México	T	Balances globales	Solo techo	Lámina galvanizada	10
May-Tzuc et al. (2019)	México	T-E	Programación genética	Prototipo	Lámina galvanizada	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14
Li et al. (2020)	China	T-E	Modelación CFD	Prototipo	Ladrillo con PCM	20
Hou et al. (2021)	China	T-E	-	Prototipo	Ladrillo con PCM	20
Godoy-Rangel et al. (2022)	México	E	-	Prototipo	Panel de cemento	30

Tabla A2. Techos ventilados inclinados.

Autor y año	País	Estudio	Método/ Software	Edificación	Inclinación (grados)	Techo secundario	Canal (cm)
Hirunlabh et al. (2001)	Tailandia	T-E	Código propio	Vivienda	60	Tejas	14
Ciampi et al. (2005)	Italia	T	Código propio	Vivienda	20, 30, 60	Lámina de cobre y Tejas	12
Biwole et al. (2008)	Francia	T-E	Código propio	Prototipo	15-80	Placa de hierro	10
Chang et al. (2008)	Taiwán	E	-	Vivienda	0, 30, 45, 60, 80	Lamina de acero ondulada	5, 10, 15, 20
Lai et al. (2008)	Taiwán	E	-	Prototipo	30, 45, 60	Lamina de acero color negro	2.5, 4.37, 5, 6.56, 7.5, 8.56
Lee et al. (2009)	Corea	E	-	Prototipo	0-80	Lamina de acero ondulada	6
Liberati et al. (2009)	Italia	T-E	Funciones cosinusoidales de x y	Establo	11.3	Lamina corrugada de fibrocemento	Ático
Patania et al. (2011)	Italia	T	Ansys	Vivienda	20-40	Tejas	10
Susanti et al. (2011)	Japón	T-E	Balances globales	Fábrica	20	Lámina acero corrugada	7
Banionis et al. (2012)	Lituania	E	-	Prototipo	2	Lamina de acero color café	5
Hernández y Morillón (2013)	México	T-E	Matemática	Prototipo	30	Vidrio	15
Yew et al. (2013)	Malasia	E	-	Prototipo	30	Lamina con pintura blanca	6.6
Tong y Li (2014)	Singapur	T-E	Ansys	Prototipo	30	Yeso	8
Omar et al. (2017)	Djibouti, África	T	Ansys	Vivienda	5	Lámina galvanizada	20
Shen et al. (2017)	China	E	-	Prototipo	45	Tejas de barro negras	10
Zingre et al. (2017)	Singapur	T-E	Código propio	Edificio 13 niveles	5	Ferrocemento	14, 50

Tabla A3. Techos ventilados a dos aguas.

Autor y año	País	Estudio	Método/ Software	Edificación	Inclinación (grados)	Techo secundario	Canal (cm)
Levinson et al. (2007)	EU	E	-	Prototipo	60	Tejas	Ático
D'Orazio et al (2008)	Italia	E	-	Vivienda 2 niveles	45	Lamina de acero ondulada	3.1, 4.1, 4.4, 6.1
Gagliano et al. (2012)	Italia	T	Ansys	Vivienda	30	Losa de cemento	10
Li et al. (2016)	China	T	Ansys	Vivienda	40	Lámina de aluminio	10
Gullbrekken et al. (2017)	Noruega	E	-	Prototipo	40	Madera	4.8
Hansen y Moller (2017)	Dinamarca	E	-	Vivienda (30)	20-60	Varios materiales	Ático
Bianco et al. (2018)	Italia	T	Ansys	Vivienda	30	Baldosas de ladrillo	10
Hansen y Moeller (2019)	Dinamarca	E	-	Viviendas (34)	20-60	Varios materiales	Ático

B. Fichas bibliográficas de los artículos revisados.

Hirunlabh et al. (2001) estudiaron el rendimiento de un captador solar de techo (RSC) para maximizar la tasa de ventilación natural para mejorar el confort térmico interior de las viviendas de Tailandia. El modelo desarrollado se validó con datos experimentales del techo ventilado y posteriormente se hicieron simulaciones donde se varió el ángulo de inclinación y la longitud. La parte experimental consistió de cuatro diseños de cubierta exterior: una placa plana, diferentes secciones cortas de placa plana, secciones más largas de placa plana y un techo cercano al tradicional tailandés; el RSC se realizó utilizando tejas de techo CPAC monier en la parte superior y paneles de yeso en la parte inferior, que se seleccionó por su baja conductividad térmica, bajo precio y la amplia aceptación de la gente. Se recolectaron datos de temperatura en las superficies del techo y condiciones ambientales cada hora durante tres meses. Los autores encontraron que cuanto mayor es el canal de aire, mayor es la tasa de ventilación inducida, la cual es función de la pendiente y la intensidad de la radiación solar. De los cuatro techos ventilados el que mayor flujo de aire presentó fue el tradicional tailandés. Finalmente, se recomienda para diseños posteriores un ángulo de inclinación de entre 20 y 60 ° y un canal de aire de 10-14 cm.

Ciampi et al. (2005) evaluaron el rendimiento de techos ventilados para la reducción de las cargas térmicas en el periodo de verano de Italia. Compararon dos tipos de techo ventilado que varían en su capa exterior: uno es de placas de cobre VR1 y otro de tejas terracota VR2 colocadas sobre vigas de madera. Ambos techos de 0.65 x10 m tienen un canal de aire de 12 cm, ángulo variable de 20, 30 y 60 ° y una capa de aislamiento térmico colocada dentro del conducto sobre la estructura base. De la simulación se observó que el techo más conveniente, desde el punto de vista energético es el VR2, pero la presencia de elementos de soporte, como vigas de madera, reduce el ahorro de energía que se puede

lograr. Para el periodo de invierno donde la temperatura interior es mayor que la temperatura exterior se aconseja cerrar el conducto de aire del techo ventilado para evitar la pérdida de calor. Por otro lado, el grosor del canal de aire de 2-15 cm es particularmente conveniente en edificios de altura moderada y área amplia, alcanzando un ahorro energético superior al 30%.

Dimoudi et al. (2006) realizaron un estudio experimental para analizar el comportamiento térmico de un techo ventilado, con y sin barrera radiante, y optimizar su rendimiento. Los resultados se compararon con los de un techo tradicional para el periodo de verano de Grecia. Las celdas de prueba fueron cajas altamente aisladas (8.4x3.8x3.6 m) ubicadas al aire libre y equipadas con un sistema de aire acondicionado. El techo tradicional consistía de una losa de concreto, aislante y una capa de compresión. El techo ventilado estaba formado por una losa de concreto, un aislante, una capa de aire que se varió de 6 a 8 cm y por último una losa de concreto. En el centro de la parte ventilada del techo, se colocó una chimenea circular de 35 cm de altura y 5 cm de diámetro para facilitar la extracción del aire caliente del conducto ventilado. Se monitorearon las condiciones internas y externas cada minuto midiendo la radiación, velocidad y dirección del viento, humedad, temperaturas del aire y de la superficie, potencia de calefacción y refrigeración. La temperatura de los techos ventilados y tradicionales presentaron diferencias significativas durante el día, desde 8 °C para el techo ventilado sin barrera radiante hasta 14 °C con una barrera radiante. Finalmente, el espacio de aire más pequeño funciona mejor durante la noche, pero solo sin una barrera radiante sobre una base de 24 h.

Levinson et al. (2007) realizaron un estudio teórico experimental donde se comparó el rendimiento energético de cuatro colores de tejas (estándar, negras, blancas y reflectantes) colocadas sobre una lámina de metal. Se construyeron cuatro prototipos a escala 1:10 con un sistema de aire acondicionado interconectado con capacidad de 120 W controlado por

un termostato eléctrico, las paredes exteriores se pintaron de blanco y se colocó aislante en paredes, piso y techo. Con el experimento se validó el modelo y posteriormente se modeló una casa típica (139 m²) por un año en tres ciudades: Fresno, San Bernardino y San Diego California, EU. En el lugar de prueba se midió la temperatura interior y exterior de las diferentes capas del techo, la radiación, velocidad y dirección del viento y humedad relativa para cada minuto, después se promediaron cada 15 minutos. La ventilación natural del ático se logró con cuatro orificios de 5 cm en el hastial. De los resultados se encontró una velocidad máxima de 1.5-2 m/s por las tardes. Las temperaturas de las superficies, del ático y del interior se redujeron a medida que la velocidad del viento aumenta a nivel del techo. La teja con mejor rendimiento con y sin aire acondicionado fue la blanca, es quien mayor temperatura y calor disminuyó. Los ahorros de energía de toda la casa son 92 kWh/año en Fresno, 67 kWh/año en San Bernardino y 8 kWh/año en San Diego. La reducción de la temperatura en el techo y la disminución de la demanda de energía de refrigeración conlleva ahorros energéticos y económicos, pero estos están por debajo del costo de recubrir un techo de tejas; el periodo de recuperación es de 5–7 años en los climas cálidos de Fresno y San Bernardino.

Wong y Li, (2007) realizaron un estudio teórico experimental para conocer el rendimiento energético y ver la efectividad del control de clima pasivo (techo ventilado) que se adoptó en un edificio residencial. El edificio es de 14 pisos y se analizaron 6 departamentos ubicados abajo, en medio y arriba del mismo; el cual se encuentra ubicado en Singapur. El techo secundario es de losas prefabricadas de hormigón sobre bloques sólidos. Las paredes son de diferentes materiales dependiendo de la orientación. No se consideraron ganancias internas de calor, se realizaron cuatro configuraciones de análisis: base, sombreado en las ventanas, con techo ventilado y sin techo ventilado. Los resultados que encontraron los autores es que las temperaturas internas más altas se encuentran en los pisos de en medio, las temperaturas más bajas en los pisos superiores debido a la

velocidad del viento; la radiación es la misma en los dos pisos, pero la velocidad del viento es mayor en los pisos superiores. Con el techo ventilado la diferencia de temperatura entre la superficie externa y la interna es de 25 °C, y la demanda de energía se puede reducir 11.55% respecto al techo común. Al aplicar un sombreado horizontal en las ventanas se puede ahorrar de 3.24 a 10.13% de energía dependiendo de la profundidad del sombreado.

Biwole et al. (2008) evaluaron térmicamente el comportamiento de un techo ventilado, con el objetivo de determinar los factores principales que afectan su desempeño, en términos de proteger la vivienda de cargas solares. La transferencia de calor y masa en el canal ventilado fueron modeladas numéricamente por medio del método de Elemento finito y posteriormente validadas experimentalmente. La parte experimental consistió en dos diseños de techos: el primero consistió en una placa de hierro (1 m de largo), un espacio de aire de 1.5 cm y una capa de aislamiento (3 cm de grosor). Al segundo diseño se le colocó una lámina de metal adicional sobre la primera. En el prototipo del techo se colocaron sensores para medir la temperatura, flujo de calor y velocidad del aire en los diferentes componentes del techo durante un día cada hora, para validar el modelo numérico. Después de la validación se simuló un techo real de 4x1 m donde se varió la pendiente del techo, el ancho de la cavidad, el grosor del aislamiento, la radiación solar y las emisividades de las superficies, teniendo 17 casos para la simulación. Los resultados que se obtuvieron de la simulación mostraron una temperatura de la superficie exterior del techo secundario de 67 °C. También muestran que la temperatura en el canal de aire es mayor a la entrada y salida, mientras que la velocidad del viento es mayor en el centro del canal. Conforme aumenta el canal de aire el flujo de calor disminuye. Estos resultados indican que el flujo de calor convectivo del canal se evacúa por completo fuera del canal cuando su grosor alcanza de 6-10 cm y el canal tiene un ángulo mayor 30 °.

Chang et al. (2008) construyeron prototipos de techo doble incorporando un sistema de barrera radiante (RBS) altamente reflectante (papel aluminio) para reducir la ganancia de calor del techo bajo condiciones climáticas de Taiwán. El techo ventilado consistió de una placa ondulada de acero, el canal de aire que se varió su espesor en 5, 10, 15 y 20 cm y una losa de hormigón como base. El ángulo de inclinación fue variado de 0, 30, 45, 60, 90°. Para simular la radiación se colocaron seis bombillas halógenas de tungsteno de 500 W que fueron ajustadas para que llegara al techo solamente 600 W/m². Se colocó una malla a la entrada y salida del canal de aire para evitar la entrada de animales y objetos, las condiciones climáticas fueron medidas con una estación meteorológica y en el techo se midió la temperatura y flujo de calor en las diferentes capas del techo ventilado. Las cuatro configuraciones de techo fueron: la base sin RBS, con RBS debajo del techo secundario, con la RBS en medio del canal de aire y con la RBS sobre el techo primario. Los autores encontraron que siempre que el ángulo de inclinación aumente, el flujo de calor disminuye y el rendimiento del aislamiento térmico mejora. El flujo de calor al interior es mayor en el canal de 5 cm y menor en 10 cm con todos los ángulos de inclinación, por lo que se recomienda este espesor.

Lai et al. (2008) realizaron un estudio experimental para determinar el espacio óptimo del canal de aire de un techo ventilado con el fin de reducir la ganancia de calor hacia la edificación. El modelo físico comprende dos placas paralelas inclinadas de extremo abierto; la placa secundaria es de acero color negro recubierta con una aleación de zinc y aluminio, un canal de aire y la placa primaria es de color blanco de silicato de calcio. Se realizaron varias pruebas al variar el ángulo de inclinación (30°, 45°, 60°) y el canal de aire (2.5, 4.37, 5, 6.56, 7.5, 8.56 cm) con y sin barrera radiante (poliestireno de 3 cm recubierto de aluminio) colocada sobre el techo primario. Para simular la radiación incidente en la celda de prueba se colocó un sistema de iluminación de seis bombillas halógenas de 500 W sobre el techo secundario y se midieron la radiación, la temperatura, el flujo de calor y

la velocidad del viento a lo largo de las diferentes capas. Del estudio se obtuvo que al colocar una barrera radiante el flujo de calor hacia el interior se redujo de 4 a 20%, pues la barrera radiante refleja la energía a la placa secundaria y al canal de aire, este bloqueo de energía reduce las cargas de refrigeración del edificio. Se concluye que el espesor óptimo del canal de aire es cuando la transferencia de calor (del exterior al interior) y el bloqueo de calor (del interior al exterior) es máximo.

D'Orazio et al. (2008) compararon el comportamiento energético de cuatro tipos de techos de teja formados por tejas tradicionales en la parte superior, un ducto de aire, asilamiento (poliestireno extruido) y un techo de madera. Construyeron un edificio de dos niveles (35 m²) para realizar pruebas experimentales; los techos variaron en el ducto de ventilación y el grosor de la madera. Los datos se adquirieron cada minuto por 330 días, se midió la radiación, humedad relativa, temperatura ambiente, velocidad y dirección del viento y temperatura en las diferentes capas del techo. De los techos analizados, el techo con mayor reducción en el flujo de calor es el que tiene el canal de aire más grande (reduce 4 W/m²) y el peor escenario es el techo con el canal de aire más pequeño. Las variaciones máximas de temperatura y flujo de calor entre los cuatro techos fueron 2-3 °C y 1.5-2 W/m², respectivamente. Finalmente, se concluyó que el aumento en el tamaño del conducto de ventilación provoca un aumento en las pérdidas de calor, debido a la presencia de aire exterior dentro del conducto de ventilación y a la disminución de temperatura en las superficies del techo.

Lee et al. (2009) evaluaron de manera experimental el desempeño del flujo de aire de un techo ventilado para mejorar el confort térmico en edificaciones. Los autores se centraron en seis parámetros: la ventilación del canal, la inclinación del techo, la intensidad de la radiación solar y el tamaño y geometría de la cavidad. El techo consistió en un techo convencional con un segundo techo sobre él y una cavidad de aire que los separa. El

experimento consistió de una cámara totalmente aislada que simula la habitación, un techo, un panel de calentamiento que simula las ganancias de calor por radiación y un sistema de refrigeración y calefacción. Se tomaron mediciones en diferentes puntos del prototipo y se registraron las mediciones cada 2 minutos por 90 minutos. Los resultados mostraron que un techo sin ventilación puede alcanzar hasta los 65 °C, una vez implementada la ventilación la temperatura se redujo a 27.5 °C presentándose una diferencia promedio entre un techo con y sin ventilación de 37.5 °C, mientras que un techo con inclinación de 55° reduce 24.7 °C la temperatura en comparación con un techo sin inclinación. También se observó que la cavidad de 90x30 mm reduce los flujos de calor en 286 W mientras que una geometría de 180x30 mm reduce 172 W. Los autores concluyeron que con la implementación de un techo ventilado se tiene un mejor desempeño en la regulación del confort térmico, igual concluyeron que la inclinación juega un papel importante en la reducción de temperatura y flujos de calor, y que la implementación de este tipo de techo es deseada en lugares donde la intensidad de radiación solar es alta.

Liberati et al. (2009) realizaron un estudio para optimizar los componentes de un techo ventilado, para reducir las ganancias solares en establos para ganado, por medio de un modelo teórico y pruebas experimentales. La configuración del techo ventilado consistía de: una lámina ondulada de fibrocemento en la parte superior, un panel subyacente de material aislante, el canal de aire, una lámina plana de fibrocemento y finalmente la estructura de soporte; las dimensiones fueron de 6x1 m. Se consideró el flujo de aire como uniforme y laminar, una contribución térmica interior producida por los animales la cual se simuló con lámparas incandescentes (100 W). Se midió la temperatura en cada uno de los componentes del techo ventilado; temperatura, velocidad y dirección del viento exterior, radiación solar, la temperatura al interior de la caballeriza, así como el espesor óptimo del ducto de aire. Se consideraron dos alturas en el conducto: A=7 cm y B=3.5 cm. Los resultados encontrados fueron que el movimiento del flujo de aire es forzado,

favorecido por la orientación norte-sur. El viento fue principalmente una brisa con 1.0 m/s máximo y promedio de 0.5 m/s. De los dos casos estudiados: el caso B es aproximadamente 50% más eficiente que el caso A presentando temperaturas interiores de 23.7 y 24 °C, respectivamente.

Patania et al. (2011) evaluaron el rendimiento de un techo ventilado comparado con un techo tradicional, tomando en cuenta los efectos del ángulo de inclinación, la intensidad de la radiación solar, el tamaño y la forma de la cavidad de aire. La simulación del techo la realizaron en Ansys para el clima mediterráneo de Italia. El techo ventilado (6x1 m) tiene en la parte exterior tejas de ladrillo, tablones de madera, canal de aire, fibra de vidrio y losa concreto. Se estudiaron tres tipologías de cubiertas ventiladas caracterizadas por el mismo valor de resistencia térmica, pero con diferente posición del aislante térmico: C1 aislamiento sobre el techo primario, C2 aislamiento debajo del techo secundario y C12 con mitad en la losa interior y mitad en la losa exterior. El análisis de resultados muestra que el ahorro de energía aumenta con el aumento de la radiación solar incidente; este resultado indica que los techos ventilados tienen mejor rendimiento con altos índices de radiación solar. Al variar el ángulo de inclinación se encontró un mayor ahorro de energía de 35-38 °. Para el canal de aire se encontró un espesor óptimo de 12-13 cm que podría mejorar el rendimiento del techo ventilado en condiciones de verano, ahorrando hasta un 60% de energía en comparación con un techo no ventilado. Y finalmente, el techo C1 presenta mejor rendimiento y C2 el peor.

Susanti et al. (2011) examinaron el rendimiento de la ventilación natural de una cavidad de aire entre dos placas corrugadas y lo compararon con un techo clásico. El estudio se realizó en una fábrica de un piso (5000 m²) en evolución libre y con un setpoint de temperatura (26 °C) para un clima cálido húmedo de Toyohashi, Japón. El techo ventilado estaba formado con un techo secundario de lámina metálica corrugada (0.6 mm), la

cavidad de aire (7.8 cm), un techo primario de lámina corrugada de asbesto (8 mm) y una placa de aislamiento de fibra de madera y mezcla de cemento (2 cm) con una inclinación de 20°, la entrada y salida de aire son del mismo grosor. Se consideró la transferencia de calor en una dimensión, 5 cambios de aire por hora al mantener las puertas abiertas o con aire acondicionado, sin sombreado por árboles o edificios y se dividió el techo en 20 secciones para analizar la temperatura. La solución de las ecuaciones gobernantes se realizó a través de un código computacional desarrollado en FORTRAN utilizando la técnica de balances globales en estado permanente. El canal de aire se abrió al 10, 50 y 90%, resultando que con la apertura al 10 y 90% la temperatura aumentó 11.8 y 10.8 °C respectivamente, desde la entrada hasta la salida. La velocidad del aire aumentó con el aumento de la apertura y es menor a 0.3 m/s. La diferencia máxima de temperatura en la superficie exterior entre el techo ventilado y techo común es de 19.8 °C; la temperatura del interior disminuyó con el techo ventilado 4.2 °C. Referente a las cargas para enfriamiento, son menores para el techo ventilado que para el techo simple en todos los meses simulados; la mayor reducción de enfriamiento fue del 51% en el mes de agosto. Se concluyó que en la noche la temperatura del aire en el canal es menor que la temperatura ambiente y el aumento de temperatura del aire aumenta al recorrer el canal.

Banionis et al. (2012) realizaron un estudio experimental sobre el comportamiento térmico de un techo ventilado al colocar varios tipos de cubiertas. Se construyeron dos celdas de prueba (1.9x1.5 m) de las mismas dimensiones, constituidas por una lámina (0.6 mm), un canal de aire (5 cm), lana mineral (20 cm) y madera (1 cm) con una inclinación de 2°; las paredes y piso se aislaron con poliestireno expandido (20 cm). Se realizaron cinco configuraciones de techos: 1) celda original, 2) cubierta reflectiva (25 mm), 3) tablero de aserrín (14 mm) con revestimiento reflectivo, 4) tablero de aserrín (14 mm), 5) revestimiento que refleja el calor entre dos huecos de aire ventilados; estos materiales se colocaron sobre la lana mineral. Se midió la temperatura y flujo de calor en las diferentes

capas del techo ventilado y variables climáticas como la radiación, humedad relativa, temperatura ambiente, lluvia, dirección y velocidad del viento. Los resultados que se encontraron es que la temperatura promedio de la capa de aislamiento fue mayor que la temperatura promedio del aire exterior (hasta 7.3 ° C). El flujo de calor disminuyó hasta 23.2% para el techo con la barrera reflectiva y el techo con menor reducción es el 4) con apenas 1.7%, respecto al original. Los cambios introducidos en la construcción del techo no tuvieron un gran impacto en la temperatura del espacio de aire ventilado, pero su influencia en la superficie externa de la capa de aislamiento térmico fue considerable.

Gagliano et al. (2012) analizaron el comportamiento térmico de tres techos ventilados en función de la colocación del aislamiento de la capa térmica con respecto al espacio de aire, estos son: C_{0I-V} con aislamiento térmico debajo de la capa de aire; C_{I0-V} con aislamiento térmico sobre el aire y C_{II-V} con aislamiento debajo y sobre la capa de aire. El techo ventilado fue de 6x1m, con un espesor de aire de 10 cm. Para resolver las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía en 2D, utilizaron el software Ansys Fluent, considerando flujo turbulento (utilizando el modelo k-épsilon), en estado estable y compresible. Los resultados presentaron una velocidad promedio de 0.7–0.8 m/s lo que indica que hay convección natural dentro de la cavidad ventilada. En C_{0I-V} la temperatura del aire dentro de la cavidad aumentó a lo largo de la dirección del flujo entre 5 y 6 °C sobre la temperatura del aire exterior. En C_{I0-V} la temperatura del aire dentro de la cavidad se mantiene casi igual que la del aire exterior, entre estas dos configuraciones la diferencia de temperatura es aproximadamente de 5-20 °C. Los flujos de calor se redujeron alrededor del 46% para C_{I0-V} y 57% para C_{0I-V} con respecto a los techos no ventilados. Por último, se encontró que aumentar el aislamiento de 4 a 8 cm reduce el flujo de calor un 72% respecto al techo no ventilado.

Kharrufa y Adil (2012) realizaron un estudio teórico experimental para enfriar la envolvente de un edificio utilizando un enfriamiento por evaporación de bajo costo con el objetivo de reducir las cargas de enfriamiento. Para enfriar el techo se colocó un estanque en el canal ventilado y se instaló un ventilador en un extremo del canal para forzar el aire sobre la superficie del agua y que se enfrié por evaporación. La celda de prueba estaba formada por un techo secundario de espuma de poliestireno, sujetado con tablonces de madera sobre un marco de metal; el canal de aire de 30 cm y la losa base. Las mediciones de temperatura en todos los componentes de la construcción se realizaron por cuatro días cada hora. Para simular el fenómeno de transferencia de calor se utilizó el software Ecotec, se consideró la ocupación del edificio con actividad sedentaria, ropa ligera y velocidad del viento de 0.5 m/s. Los resultados observados son la disminución de la temperatura interior. La temperatura exterior máxima alcanzó 51.9 °C y el interior era 33.4 °C, esto representa una caída de 18.5 °C. Las cargas de enfriamiento anuales para el techo ventilado y tradicional fueron de 265.65 y 2133.1 kWh, respectivamente; por último, el mayor ahorro se produce en los meses más calurosos, donde el enfriador por evaporación es más efectivo para bajar la temperatura.

Hernández y Morrillón (2013) realizaron un estudio teórico experimental para predecir el comportamiento térmico de un techo ventilado. El sistema (1x1.02 m) se compone de una placa de vidrio, una cavidad de aire variable de 3-15 cm, aluminio, aislamiento y madera con una inclinación de 30°. Para acelerar la solución de las ecuaciones gobernantes se utilizó el paquete comercial Mathematica. Se realizaron mediciones en agosto fuera del laboratorio bajo condiciones climáticas de Cuautitlán, México y se colocaron sensores de temperatura en las diferentes placas, a la entrada y salida del canal. Se midió la temperatura ambiente, en las superficies y en el canal, la humedad relativa y la radiación. La diferencia entre los datos experimentales y los analíticos es de 4.6, 6.5 y 5.4 °C para la superficie del vidrio, superficie del aluminio y la salida del canal de aire, respectivamente.

Se encontró que a medida que aumenta el flujo de calor, la placa de aluminio y la placa de vidrio aumentan su temperatura y dio un calentamiento similar al efecto invernadero.

Yew et al. (2013) realizaron un estudio experimental de un techo ventilado que evalúa un sistema que combina un recubrimiento aislante (TIC) y una cavidad de aire (MAC) integrada con una serie de tubos de aluminio que se instalan en la parte inferior del techo. Se construyeron cuatro tipos de techo diferentes: donde se combina el recubrimiento reflectivo con los tubos de aluminio (diámetro 6.6 cm) y el ático abierto o cerrado. En este estudio, las latas de aluminio recicladas se organizaron en tubos que actúan como cavidad de aire en movimiento. El recubrimiento reflectivo se formuló utilizando un pigmento de dióxido de titanio con residuos de cáscara de huevo de gallina como relleno biológico unido por un aglutinante de resina de poliuretano, cada ingrediente está en diferentes proporciones para cada techo. El modelo físico consta de celdas de prueba de acrílico Perspex (35x35x35 cm) con el techo inclinado a 30°, el techo fue calentado con lámparas de halógeno para simular la radiación solar y se tomaron mediciones de temperatura en las diferentes capas del techo y al interior. Los resultados que se obtuvieron fueron que el techo normal (sin recubrimiento reflectivo ni tubos de ventilación) presentó las temperaturas más altas en todas las capas, una máxima de 64 y 42.4 °C en la superficie exterior del techo secundario y en el interior del ático. Los tres techos restantes mostraron un comportamiento similar, redujeron la temperatura hasta 13 y 4 °C en la superficie exterior y en el interior del ático, respecto al techo tradicional. Se concluye que la adición de los tubos de aluminio en la cavidad del techo mejora significativamente la reducción de la temperatura del ático debido a su eficiente mecanismo de transferencia de calor.

Tong et al. (2014) evaluaron el rendimiento térmico de un techo ventilado y uno tradicional bajo condiciones climáticas de Singapur, para ello se utilizó el método de Transformada de Fourier Finita compleja (CFFT), el cual se validó mediante un

experimento de campo realizado en dos techos de múltiples capas del último nivel de un edificio residencial de 12 niveles; uno ventilado (losa de ferrocemento, espacio de aire, concreto y yeso) y uno tradicional (concreto y yeso). Una vez validado el modelo se diseñaron 10 tipos de techos que incluyen pintura fría, canal de aire de 22 cm, espuma de poliestireno expandido (EPS) y barrera radiante aplicados a los dos tipos de techos. La parte experimental duró tres semanas de febrero 2012 y no se consideraron ganancias internas por equipo eléctrico, personas ni intercambio radiactivo. Se midió la temperatura de las superficies de los techos, la radiación y humedad relativa en intervalos de un minuto. Los resultados mostraron un error menor al 4% entre los datos experimentales y simulados. La aplicación de la pintura fría aumenta la reflectividad solar de 0.36 a 0.72 y reduce la ganancia diaria de calor en 234 y 135 $\frac{Wh}{m^2}$ para el techo tradicional y ventilados, respectivamente. De las diferentes configuraciones de techo, la mayor reducción diaria en las ganancias de calor la presentó el techo ventilado con barrera radiante con un 84%, con EPS un 73% y un 42% para el techo ventilado simple; el techo tradicional incorporado el EPS reduce el 68%. Se concluye que en cada aumento de 0.1 en la reflectividad la ganancia de calor se reduce en 11%.

Tong y Li, (2014) realizaron un modelo teórico en 2D resuelto en Ansys Fluent para predecir el flujo de calor a través del techo inclinado con ventilación natural. Para validar se llevó a cabo un experimento de laboratorio para estudiar el movimiento del flujo de aire y la transferencia de calor por convección en el techo inclinado. Las dimensiones del techo ventilado eran de 1.5x0.8 m conformado por yeso, poliestireno expandido, calentador de caucho de silicona, placa de aluminio, canal de aire y yeso como base. La lámina de calentamiento está conectada a un controlador de voltaje para ajustar el calor generado. Se considera una temperatura interior constante de 24 °C y se midió la temperatura, radiación, flujo de calor y velocidad del viento en las diferentes capas del techo. En la parte experimental se realizan cuatro pruebas, donde se varía el

espaciamiento del canal de aire (6 y 8 cm) y la inclinación (30 y 45°). Los resultados muestran que el coeficiente convectivo aumenta gradualmente al aumentar el ángulo de inclinación en todos los casos; el flujo de calor transferido al interior aumenta significativamente con el aumento de la absorción solar y disminuye aproximadamente 6 W/m² cuando la inclinación del techo aumenta de 10 a 90°; se encontró un espaciamiento óptimo de 8 cm para el canal de aire y energéticamente es más eficiente colocar la capa de aislamiento térmico en la losa inferior del techo que en la parte superior, el flujo de calor transferido al interior se reduce de 39 a 13 W/m².

Kovac y Vojtus (2015) realizaron una simulación de un techo ventilado para conocer el comportamiento del fluido, así como el campo de temperaturas de la superficie interna de la cavidad y predecir donde se producirá condensación. La simulación se realizó en Ansys Fluent para el periodo de invierno en un edificio de Eslovaquia. El techo estaba formado con un techo secundario de concreto con impermeabilizante, un canal de aire (15 cm), aislamiento y el techo primario (losa de concreto), en la parte frontal se tenían dos orificios (6 cm) para el ingreso de aire. Se consideró un flujo de entrada al canal de 1, 2 y 5 m/s, un residual de 10⁻³ para las ecuaciones de continuidad, momento y energía. Los resultados mostraron una velocidad del fluido menor a 0.1 m/s. La mayor velocidad se encuentra a la entrada de los orificios y va disminuyendo conforme avanza. La temperatura exterior del techo primario se encuentra en el intervalo de 7-15 °C y la temperatura de la superficie interior del techo secundario está en el intervalo de 3.5-5.5 °C. También se encontró que el aire caliente del interior del edificio llega al techo (filtrándose por espacios entre las tuberías) por efectos de flotación y se mezcla con el aire del canal, esto aumenta la temperatura y humedad a 18 °C y 65%. Estos valores hacen que el vapor de agua se condense con la temperatura fría de la superficie interior del techo secundario.

Zingre et al. (2015) realizaron un estudio teórico experimental del rendimiento térmico de un techo ventilado combinado con un techo fresco en la capa secundaria para un clima tropical de Singapur. Se compararon cuatro configuraciones de techo: un techo plano con y sin revestimiento fresco (acrílico a base agua color blanco), un techo ventilado con y sin revestimiento fresco en la capa secundaria. La capa que está expuesta a la radiación es de ferrocemento (3 cm), sigue un canal de aire (22 cm) y como techo primario una losa de hormigón (10 cm). Para la validación del código numérico se hicieron mediciones en dos departamentos de un edificio de 12 pisos para un día nublado y uno soleado. Se midió la radiación solar, humedad relativa, emisividad, reflectividad, temperatura exterior, interior y en la superficie del techo. Se consideró el flujo de calor y aire en 1D y no hay fuentes internas de calor. Los resultados que se obtuvieron fue la reducción de la temperatura en la superficie del techo secundario y primario al implementar la capa de recubrimiento frío. Para el día soleado hubo una reducción de hasta 14.7 y 11.9 °C en el techo secundario y primario respecto al original. Para el día nublado se redujo hasta 7.1 y 5.3 °C en el techo secundario y primario respecto al original sin recubrimiento. De los cuatro techos analizados el techo ventilado fresco mostró mejores resultados en la reducción anual de ganancias de calor con 82%, el techo ventilado original con 66%, el techo plano fresco con 54% respecto al techo plano tradicional. Se concluyó que la diferencia máxima entre los valores medidos y simulados es de 2.2 °C. El techo ventilado impide las ganancias de calor, pero también impide las pérdidas durante la noche, debido a la capa aislante de aire. El techo plano fresco absorbe más energía durante el día que el ventilado, pero permite mayor pérdida durante la noche, lo que da como resultado una reducción similar neta diaria de ganancias de calor del 62%.

Li et al. (2016) desarrollaron un modelo de transferencia de calor en 3D para predecir el flujo de calor de un techo con ventilación natural utilizando la simulación de CFD en Ansys Fluent bajo condiciones climáticas del noreste de China. Usaron el modelo k-

épsilon, consideraron la presión y temperatura exterior como condiciones de frontera a la entrada y salida del canal de aire. Las ecuaciones gobernantes se discretizan empleando el volumen finito y la simulación requirió seis días para alcanzar la convergencia. Se investigó el efecto de diferentes parámetros del techo sobre el comportamiento térmico de los techos ventilados y se varió el canal de aire (6, 10, 14, 18, 22, y 26 cm), el ángulo de inclinación, el grosor de la salida del canal y la absorción de la capa secundaria (0.6, 0.7, 0.8 y 0.9). La dimensión del techo es de 3x3 m formada por cuatro capas: placa de aleación de aluminio (techo secundario), canal de aire (10 cm), concreto fino y concreto reforzado. Los resultados mostraron que a medida que aumenta la pendiente del techo la temperatura promedio y el flujo de calor del techo base disminuyen; el calor removido por la capa de aire, la temperatura promedio y la velocidad del aire a la salida aumentan con los coeficientes de absorción de la superficie externa del techo. Finalmente, para mejorar el rendimiento del techo se recomienda un espaciamiento del canal de aire e inclinación del techo de 10 cm y del 33-40%.

Omar et al. (2017) estudiaron los beneficios de usar techos ventilados para reducir la carga de enfriamiento bajo el clima de Djibouti África, y compararon el rendimiento térmico del techo ventilado con un techo tradicional. Para ello validaron su modelo numérico en Ansys Fluent con datos experimentales de la literatura y después evaluar el rendimiento energético para diferentes configuraciones: la primera consistió en dos elementos planos con una cavidad de aire entre ellos de 20 cm con una placa metálica de 6 mm como techo secundario. En la segunda configuración, se agrega un aislamiento de 5 cm en la losa interna. Se asume la inclinación tradicional (5°) y la longitud de 5 m del techo. Los resultados de CFD mostraron que las temperaturas más altas se encuentran a la salida del canal y en el aire que está en contacto con el techo secundario; el aire a la salida del canal es 12 °C mayor que el aire a la entrada del canal. Finalmente, encontraron

que un techo ventilado reduce 50% el flujo de calor al interior y un ventilado con aislamiento reduce el 85% respecto a un techo tradicional.

Gullbrekken et al. (2017) realizaron un estudio sobre la influencia de la temperatura, la velocidad del aire de ventilación y la condensación en los períodos de primavera, verano y otoño dentro de una cavidad de madera ventilada a gran escala. La cavidad de aire medía 55.2 cm de ancho, 4.8 cm de alto y 10.8 m de largo con un ángulo 40°. El techo ventilado consistía de una capa de madera (OSB) de 1.25 cm, recubierta de bituminosa en la parte superior, una capa de aire de 4.8 cm sobre madera y un aislante de 40 cm. Se colocaron en el techo sensores de temperatura y de velocidad del aire. Por otra parte, una estación meteorológica medía la temperatura y la velocidad del viento cada minuto. Los resultados incluían la temperatura, la velocidad del aire y la velocidad del viento durante la primavera (del 22 de marzo al 31 de marzo), el verano (del 3 al 15 de julio) y el otoño (del 21 al 29 de septiembre). En verano la temperatura máxima en la superficie inferior del techo fue cercana a los 60 °C y en otoño la temperatura osciló entre 11 y 17 °C, en general las velocidades del viento fueron bajas. Finalmente, se encontró la tasa promedio de cambios de aire de los tres períodos de medición, los cuales se puede estimar en 11 h⁻¹ durante los períodos con baja velocidad del viento y 84 h⁻¹ durante los períodos más ventosos.

Hansen y Moller (2017) estudiaron de manera teórica experimental la variación de la humedad en áticos ventilados con diferentes tipos de techos; analizaron la influencia de la barrera de vapor y el grosor del aislamiento en la humedad del aire. El estudio se realizó en 30 edificios divididos en 4 categorías: A (sin barrera de vapor), B (con barrera de vapor), C (con barrera de vapor y aislamiento basado en celulosa) y D (con barrera de vapor y aislamiento basado en lana mineral). Algunas de las casas se localizan a más de 100 km de distancia una de la otra. Se midió la temperatura y humedad relativa por un

año en el interior de la vivienda, en el exterior y en ático. Como resultado se tienen 0.5 °C de diferencia entre los datos simulados y medidos. No hay formación de moho, excepto en la configuración B-09 donde hubo condensación y humedad en el material aislante, porque tiene pocas aberturas de ventilación. Para que crezca moho, se tiene que exceder el 95% de humedad relativa a 10 °C, y sólo se excedió en invierno. El grosor del aislamiento para los edificios A y C (46.6 cm) es diferente a los edificios B y D (21 cm) a pesar de la diferencia en el grosor, la temperatura del ático presenta pequeñas diferencias. Los edificios A tienen bajos niveles de HR y los B, tienen altos niveles. Por último, se encontró que la temperatura en el ático es muy similar en todos techos.

Shen et al. (2017) realizaron un estudio teórico experimental comparativo del rendimiento térmico de dos techos de tejas negras: uno de doble capa y uno simple para la época de invierno en China. La parte experimental consistió en dos celdas cubicas con techos inclinados, uno simple y uno doble con canal de aire de 10 cm; paredes de vidrio y poliestireno extruido al interior, pintadas de blanco para reflejar la radiación. En las celdas de prueba se colocaron sensores para medir el flujo de calor al interior de la celda, la temperatura en cada superficie y en el aire del canal cada 5 minutos. Los parámetros ambientales se obtuvieron de una estación meteorológica cercana a las celdas de prueba. Los autores hallaron que el techo de una capa tenía 5 °C más que el techo doble durante el día, pero 2 °C menos durante la noche; el flujo de calor se redujo 85% con el techo doble respecto al techo simple; las temperaturas del techo doble fueron menos sensibles a las variaciones ambientales y el canal de aire funciona como un aislante que bloquea el aumento de calor durante el día, lo que es desfavorable en invierno, pero beneficioso en verano.

Zingre et al. (2017) formularon un modelo analítico de transferencia de calor utilizando el método espectral para la solución de las ecuaciones gobernantes para un techo

ventilado de extremo abierto, aplicable a edificios con aire acondicionado y ventilación natural en techos y fachadas; que considera los materiales y ángulo de inclinación; todo ello para predecir el comportamiento térmico dinámico del techo ventilado en cualquier condición climática. Se validó el código con estudios experimentales en dos departamentos de un edificio de 13 pisos; se compararon dos tipos de techos: uno ventilado constituido por un techo secundario de ferrocemento (3 cm) inclinado a 5°, un canal de aire (de 14 a 50 cm) y el techo primario de hormigón (10 cm); y uno plano formado por losa de hormigón y un aislante (20 cm) en el exterior en cinco climas diferentes (San Francisco, Barcelona, Sídney, Atenas y Singapur). Se considera el flujo de calor y aire en 1D y no hay fuentes internas de calor. Las variables climáticas que se midieron fueron la temperatura y humedad relativa del interior de la edificación y del canal de aire, la temperatura en las superficies del techo, la radiación solar, la emitancia y reflectancia cada minuto y se promediaron para cada hora. Del estudio resulta que las ganancias de calor son menores un 34% en el techo ventilado que en el plano aislado. Al aumentar el ángulo del aislamiento se reducen las ganancias y pérdidas de calor. Se concluye que el techo ventilado permite de 3 a 5 veces más pérdidas de calor que el plano aislado y se recomienda el uso de techos ventilados en climas dominados por la refrigeración y los aislados en los dominados por la calefacción.

Beltrán (2018) realizó un estudio numérico bidimensional pseudo-transitorio de la transferencia de calor conjugada de un techo ventilado para encontrar el espacio óptimo del canal de aire. El techo secundario consta de una lámina galvanizada y el techo primario de una losa de concreto de 12 cm de espesor. El estudio se realizó para tres ciudades (Mérida, Cd. Juárez y CDMX) que representan diferentes climas de México y se tomó el día más cálido y más frío para las simulaciones. Las condiciones climáticas que se consideraron fue la temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar, el fluido del canal como aire seco, laminar y como un medio no participante; la temperatura del

interior de la habitación se consideró fija en 25 °C. Para encontrar la temperatura optima se varió el canal de aire de 1 a 15 cm. Los resultados a los que llegó el autor fue el espacio óptimo del canal de aire para el día cálido y frío de 10 y 11 cm, respectivamente. En Mérida se logró reducir la temperatura interior de 43.7 a 29.3 °C con el techo ventilado y las cargas térmicas anuales se reducen en un 82%. En la CDMX la temperatura interior se reduce de 27 a 23 °C con el techo ventilado y las cargas térmicas anuales se reducen en un 76%, este clima presentó pérdidas de calor a lo largo del día. Para Cd. Juárez el intervalo de temperatura promedio anual para el canal de aire es de 23-32 °C y la reducción anual de cargas es de 56%. En este clima no se recomienda el uso de estos techos debido a que en la ciudad se registran temperaturas ambiente bajo cero y el uso de techos ventilados no causaría ningún efecto. Finalmente, concluyó que los flujos de calor al interior se reducen gracias al sombreado del techo ventilado y debido a la circulación de aire dentro del canal. Recomienda el uso de techos ventilados en climas cálidos.

Bianco et al. (2018) realizaron el análisis numérico del comportamiento térmico de un prototipo de techo para uso residencial, el cual consistió en una cavidad rectangular inclinada que proporciona ventilación por convección natural. El techo es a dos aguas y consideraron tres casos de estudio bidimensionales en estado permanente y régimen turbulento, que son: una geometría que consiste en la mitad del dominio (G1), una geometría tomando en cuenta la cresta completa del techo (G2) y una geometría completa (G3) tomando toda la sección del techo. El techo medía 6m de largo con una inclinación de 30° con respecto al plano horizontal, con una altura de 10cm para la cavidad de aire. Se variaron las condiciones de frontera en la superficie inferior del techo y el flujo de calor en el muro superior de acuerdo con la posición del sol y para la turbulencia se usó el modelo $k - \epsilon$; por lo que, se analizaron 15 configuraciones. Los resultados mostraron que la geometría con doble sección de salida (G1) fue más eficiente en cuanto a la razón de flujo másico, sin embargo, los casos adiabáticos muestran una mayor razón de flujo

másico con respeto a las condiciones de verano e invierno, lo cual sugiere que es mejor evitar los flujos y la transferencia de calor hacia el ambiente interior.

Chen et al. (2019) analizaron la emisividad (ε) de la parte inferior de losetas de concreto de un techo ventilado, para controlar la entrada de calor al interior del edificio a través del techo. El estudio se realizó en China donde las tejas de concreto son utilizadas debido a su resistencia al viento y a daños por granizo, por su precio atractivo y fácil instalación. Se construyó un módulo de prueba (2.04x2.04x1.8 m) donde se le colocaron las losetas de concreto (66x66x2.5 cm) con una capa de pintura en la parte inferior, esta posición evita la acumulación de polvo y que se deteriore la pintura (mezclado de pigmento blanco, polvo de aluminio y acetona en diferentes fracciones). El canal de aire del techo ventilado era de 7.5 cm y se midió la temperatura en diferentes alturas del canal de aire para confirmar la influencia de la emisividad de la parte inferior de la teja; los flujos de calor y datos meteorológicos se registraron en un intervalo de 5 minutos. Los resultados que encontraron fueron: que la ε depende de la temperatura; que bajar la ε de 0.93 (corresponde al techo tradicional) a 0.32 (techo pintado) disminuye la temperatura diaria de la cubierta del techo aproximadamente de 3-8 °C y la entrada de calor al edificio aproximadamente $2.4 \frac{kWh}{m^2}$. Otro punto interesante es que la temperatura del mosaico de menor ε es más alta que el mosaico de referencia, la razón puede ser que una loseta con baja ε impide que el calor de la loseta se propague hacia abajo.

Leccese et al. (2019) presentaron un modelo analítico, desarrollado por medio de balances globales en una dimensión, para evaluar el caudal de aire de ventilación necesario para evitar la condensación intersticial de fachadas y techos planos ventilados con el fin de evitar el moho debido a la humedad. El modelo proporciona un método para evaluar la razón de flujo de aire necesaria para evitar la condensación en techos planos ventilados, en función de parámetros geométricos (espesor del aislante térmico, distribución del canal

ventilado y capas de material), propiedades termofísicas (conductividad térmica, resistencia al vapor del aislante térmico, razón de producción de humedad), climáticos (temperatura y humedad relativa del ambiente). Se simularon dos techos, con el canal de aire-impermeabilizante por debajo (R1) y arriba (R2) de la losa de hormigón. De los resultados se encontró que las tasas de flujo de aire requeridas por el techo R2 son significativamente más bajas que las requeridas por el techo R1. En techos planos se requiere la ventilación forzada para inducir el movimiento de aire, en techos inclinados se produce por el efecto de flotación del aire; y encontraron que todos los caudales de aire son bastante bajos, un caudal mayor es fácil de obtener con un ventilador eléctrico de tamaño pequeño adecuado para la instalación en exteriores.

Lima (2019) realizó un estudio comparativo del comportamiento térmico de un techo tradicional y un techo ventilado para el ahorro de energía bajo condiciones climáticas de Hermosillo y Mérida. El techo ventilado estaba formado por una cubierta secundaria de lámina galvanizada, canal de aire de 10 cm y losa de concreto de 12 cm; y el techo tradicional solo cuenta con una losa de concreto. El estudio comprendió la inercia térmica, convección forzada en el canal de aire, temperatura interior constante de 25 °C, aire seco en el canal por lo tanto no se considera radiativamente participante y los datos climáticos utilizados fueron para el día más cálido y más frío de cada mes del año 2014. Una vez realizada la simulación, se encontró para la ciudad de Hermosillo en el día cálido una temperatura máxima de la superficie interior de 40 y 36 °C para el techo de concreto y techo ventilado, respectivamente. Un flujo de calor de 267.6 y 137 W/m² para el techo tradicional y ventilado, respectivamente. Para el día frío, la temperatura de la superficie interior y el flujo de calor del techo de concreto y ventilado es de 29.3 y 23.8 °C, 78.6 y -1.30 W/m², respectivamente; el resultado negativo indica que el flujo de calor salió de la habitación. Para Mérida en el día cálido se observó una temperatura máxima de la superficie interior de 38.8 y 31.6 °C en el techo de concreto y ventilado, respectivamente.

Un flujo de calor de 223.1 y 89.6 W/m² para el techo tradicional y ventilado, respectivamente. Para el día frío, la temperatura de la superficie interior y el flujo de calor del techo de concreto y ventilado es de 32.7 y 25.6 °C, 129.2 y 18.7 W/m², respectivamente. Respecto a la inercia térmica, el factor de retraso es de una hora y se obtiene una diferencia de 6.1 °C en comparación al techo de concreto, este efecto se debe a la configuración del techo ventilado.

May-Tzuc et al. (2019) realizaron un estudio teórico experimental para predecir la ganancia de calor por metro cuadrado para un techo plano ventilado utilizando un conjunto de datos experimentales. Para la modelación se desarrolló un enfoque de programación genética de múltiples genes (MGGP) llevada a cabo en MATLAB y GPTIPS 2.0. La celda experimental (1x1x1 m) tiene como techo primario una losa de concreto (6 cm), como techo secundario una lámina galvanizada de acero y un canal de aire que se varió en su grosor de 0-14 cm. Los datos de entrada para el modelo son los diferentes anchos del canal y la irradiación solar, velocidad del viento, humedad relativa y temperatura ambiente. En la celda de prueba se midió la temperatura en las superficies, la temperatura interior, el flujo de calor en el techo y las condiciones ambientales. Los resultados que encontraron fue que el modelo MGGP proporciona buenas estimaciones del flujo de calor a través del techo ventilado con respecto a los valores experimentales, logrando una R²= 0.9452% y RMSE = 3.7361. Respecto al ancho del canal de aire se encontró que la mayor ganancia de calor se presenta con un grosor de 1 cm para todos los meses, y la menor ganancia en un canal de 11-13 cm. Por último, se concluye que el ancho del canal (55.54%) y la temperatura del aire exterior (17.09%) son los componentes principales involucrados en el flujo de calor a través del techo ventilado.

Hansen y Moeller (2019) probaron experimentalmente el efecto de una barrera de vapor, el tipo y grosor del aislamiento para evitar la humedad de los áticos ventilados en edificios

existentes de Dinamarca. Para el estudio se investigaron 34 edificios residenciales con áticos ventilados, divididos en cuatro categorías: A) sin barrera de vapor, B) con barrera de vapor de polietileno, C) con barrera de vapor de aluminio y aislamiento basado en celulosa y D) con barrera de vapor de aluminio y aislamiento basado en lana mineral. En las viviendas analizadas se encontraron espesores de aislamiento de 15-60 cm; se colocaron sensores dentro y fuera del ático para medir la temperatura y la humedad del aire interior y exterior, y se recabaron datos cada hora por un año. Se observó que algunas de las viviendas presentaron crecimiento de moho y cinco viviendas tenían las aberturas de ventilación más pequeñas que las recomendadas. Contrariamente a lo esperado, el grosor del aislamiento y la barrera de vapor no tuvieron efecto sobre la temperatura o la humedad relativa del ático. La ventilación es más importante que los parámetros investigados. Mientras la tasa de ventilación del ático sea suficiente y la construcción del techo sea hermética, no hay indicios de que se necesite una barrera de vapor.

Li et al. (2020) construyeron dos celdas de prueba con techo ventilado, a una se le instaló un techo ventilado compuesto con material de cambio de fase múltiple (VR-MPCM) y en la otra celda se instaló un techo ventilado convencional (CVR). El techo está conformado por placas de PCM sobre el techo de ladrillo, un canal de aire de 20 cm, una nueva capa de PCM y finalmente un tablero de yeso. Todos estos componentes están sobre paredes de madera, y las dimensiones de las celdas son de 1.7x1.7mx2.1m. Las variables medidas fueron la temperatura y el flujo de calor en diferentes puntos de las celdas del año 2018 bajo las condiciones climáticas de Tianjin, China. Con los datos experimentales realizaron una validación del modelo propuesto mediante una simulación CFD y los resultados encontrados fueron que el modelo de CFD comparado con los datos experimentales presentan una diferencia de 0.3 °C con el indicador RMSE. Respecto a las temperaturas, la caída de temperatura interior con VR-MPCM es de 44%, mientras que con CVR es de 33%. La reducción promedio en el canal de aire es de 8.8 °C con el techo

VR-MPCM. Finalmente se sugieren que existe un rendimiento de ahorro de energía significativo del VR-MPCM debido a su capacidad para mantener alejado el calor del ambiente exterior.

Hou et al. (2021) realizaron una comparación entre un techo ventilado convencional y un techo ventilado con material de cambio de fase (PCM). El sistema estaba conformado por losetas de PCM al exterior, un canal de aire de 20 cm y una segunda capa de PCM. Las celdas de prueba tenían una dimensión de 1.7x1.7mx2.1m con paredes de madera de 1 cm de espesor. El experimento consistió de tres etapas: I: puertas, ventanas y ventilación cerradas. II: puertas y ventanas cerradas, y ventilación abierta periódicamente. III: igual que el caso anterior además de que agregaron un sistema de tuberías con agua para enfriar el techo. Se midieron la temperatura y el flujo de calor en las diferentes capas del sistema. Los resultados indican que la etapa I puede reducir la temperatura del aire interior hasta 35.5%; la etapa II hasta 44.9% y la etapa III hasta un 47%, lo que equivale a reducir 3.7, 6.8 y 8.2 °C en cada una de las etapas. Así mismo, la etapa III presenta el mejor desempeño para reducir la tasa de insatisfacción del ambiente térmico interior en un 40.2%.

Godoy et al. (2022) compararon experimentalmente el desempeño térmico de techos ventilados en condiciones climáticas semiáridas cuando se combina el Material de Cambio de Fase (PCM) y la ventilación natural. Se evaluaron cuatro configuraciones: elementos de cubierta continuos (caso A), con cámara de aire en la cubierta (casos B), con y sin ventilación natural (casos C y D). Se midieron la temperatura y el flujo de calor. Después del periodo de medición encontraron que las configuraciones con PCM, mostraron una reducción de la temperatura del aire interior entre 3-7%. Y el mejor resultado se obtuvo con una cámara de aire de 30 cm sin ventilación natural al reducir la temperatura máxima del aire interior hasta en 2.5 °C lo que equivale a una reducción de la carga de refrigeración del 6.8% y una mejora del confort térmico en 50 min.

Coma et al. (2014) evaluaron la contribución real de las fachadas verdes para el ahorro de energía en condiciones controladas (setpoint de 24 °C) y evolución libre para el clima Mediterráneo de España. La parte experimental consistió en colocar cuatro enredaderas: *Hedera hélix*, *Lonicera japónica*, *parthenocissus tricuspidata* y *Clematis sp* sobre una malla base para que trepasen por ella y analizar la resistencia, la altura que pueden alcanzar, la disponibilidad en los viveros, la adaptación al suelo y a los módulos. Se observó que las especies crecieron 1 m de verano a invierno y en otoño perdieron las hojas. La vegetación *parthenocissus tricuspidata* fue seleccionada por presentar el mejor rendimiento y se colocó en tres paredes de un módulo de prueba de 3x3x3 m hechos de ladrillo, mortero y yeso. Se realizaron dos periodos de prueba con la vegetación al 50% de la fachada y se midió cada 5 minutos al interior y exterior la temperatura y humedad relativa, consumo eléctrico y radiación. Los resultados indican que la temperatura se reduce en la superficie exterior respecto a la pared tradicional 10 y 14 °C para condiciones controladas y libres, respectivamente. La energía se redujo 1% con las condiciones internas controladas. Finalmente, se encontró una diferencia de 18 °C en la superficie exterior de la pared con y sin vegetación.

Coma et al. (2017) realizaron un estudio experimental para comparar a escala real el rendimiento térmico de una fachada verde, una pared verde y una fachada tradicional, implementados en celdas de prueba (3x3x3 m.) tanto para periodos de enfriamiento (24 °C) como de calefacción (22 °C). La vegetación se colocó en 3 paredes de los prototipos, para la fachada verde se usó *Parthenocissus tricuspidata* con un espacio de aire de 25 cm entre la vegetación y la pared. Para la pared verde se colocaron macetas con fibra de coco como sustrato que contenían 24 plantas de la especie *Helichrysum thianschanicum*. Se instaló un aire acondicionado en cada celda de prueba y se registró su consumo de electricidad cada 5 min al igual que la temperatura interior y exterior del aire, cerramientos y vegetación; humedad relativa y radiación. Los resultados mostraron un

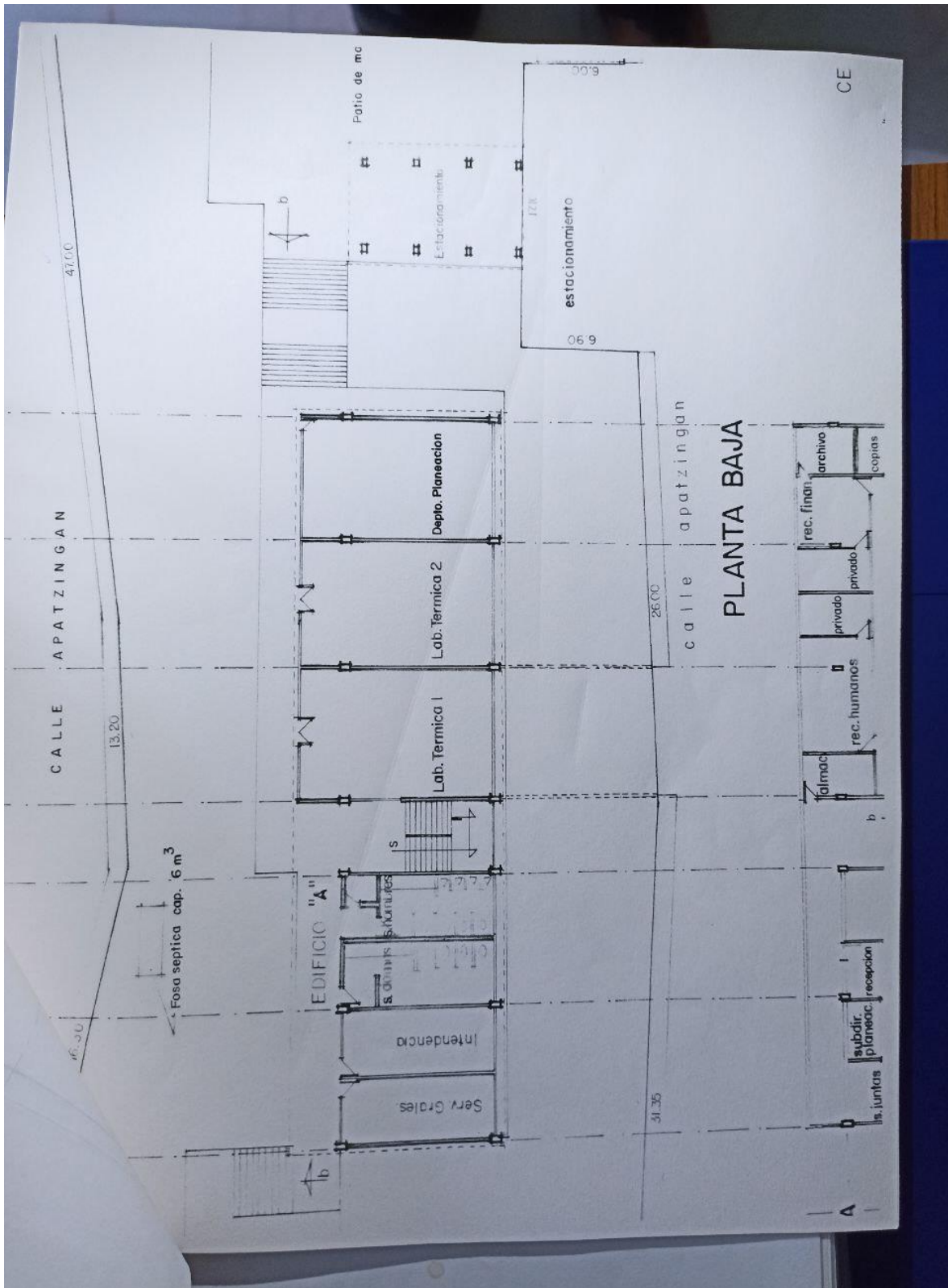
alto potencial de ahorro de energía durante la temporada de enfriamiento para la pared verde (58.9%) y la fachada (33.8%) en comparación con el sistema de referencia. Finalmente, se observó que durante el período de invierno la fachada verde presenta valores similares al cubículo de referencia, debido a que la planta Boston Ivy perdió sus hojas, por lo tanto, ambos cubículos permiten la ganancia solar directamente en las paredes.

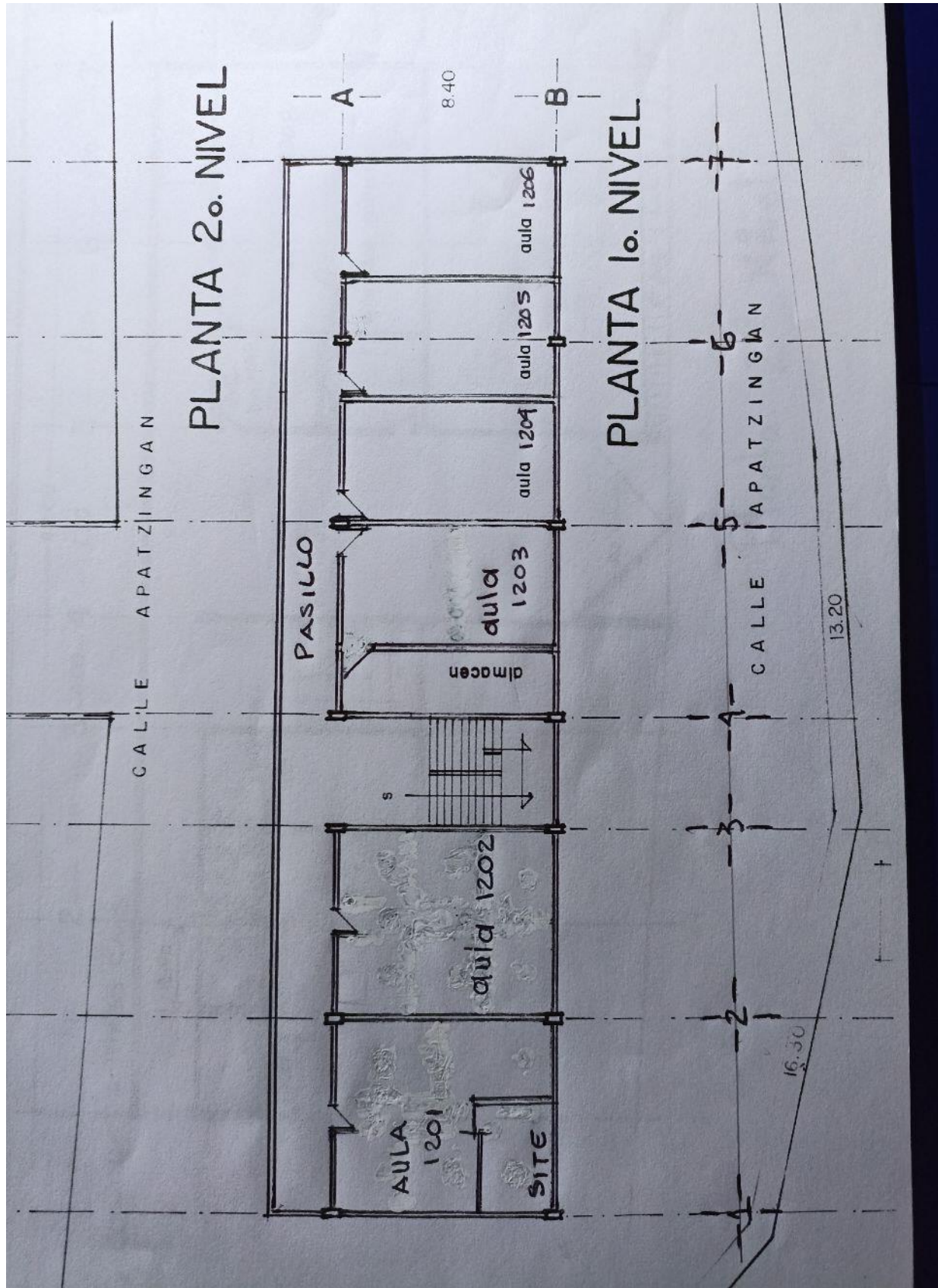
Dahanayake et al. (2017) realizaron un estudio de la selección adecuada de las plantas para paredes verdes y conocer el efecto de diferentes parámetros de la vegetación en el consumo de energía de la edificación. El trabajo se realizó mediante simulaciones en el software EnergyPlus para demostrar el efecto que las plantas traen a un edificio de oficinas de 50x50x100 m en el clima de Hong Kong. La estructura consistió de los cerramientos, el sustrato y la vegetación que cubre el 50% de la fachada; esta última se varió su espesor y LAI de 5, 10, 20, 30 y 40 cm y de 1-5, respectivamente. El modelo toma en cuenta la radiación de onda larga y corta, el intercambio radiativo dentro de la vegetación, convección, evapotranspiración y conducción en el sustrato. La simulación se realizó para un año con datos climáticos de un año típico de la ciudad. Se consideró la iluminación, ocupación, uso de equipo eléctrico y un setpoint de enfriamiento de 24 °C. Los resultados arrojan que un aumento en el LAI de 1 a 5 reduce la temperatura exterior de 52 a 40 °C, las cargas térmicas de 3.8 kWh/m² a 10 kWh/m². Los autores concluyeron que a mayor LAI mayores ahorros energéticos y el incremento de la altura de 5-40 cm causa una reducción en las cargas de enfriamiento de 0.09%, por ello se recomiendan plantas pequeñas, ya que este valor no es significativo.

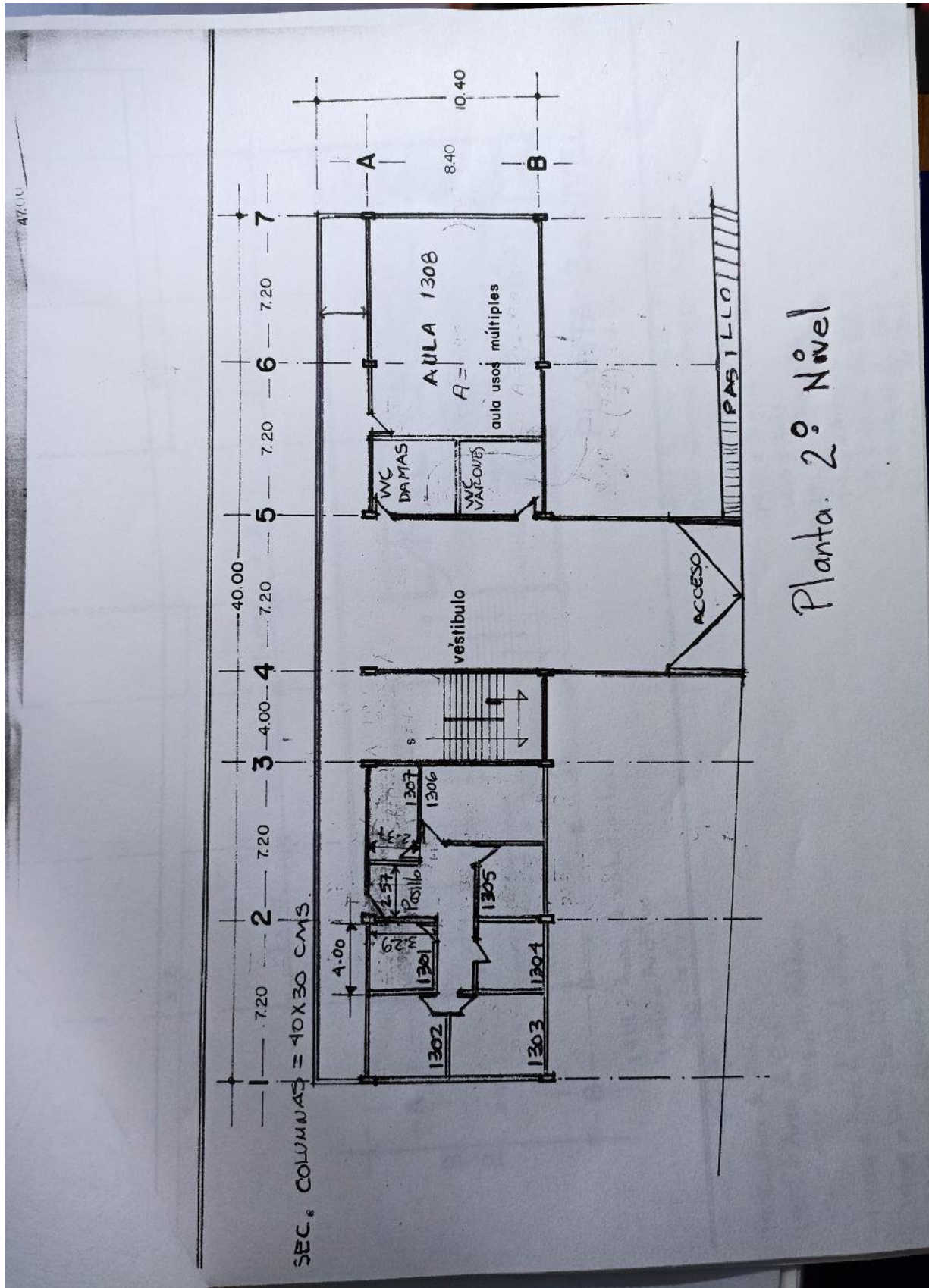
Vox et al. (2018) realizaron un estudio comparativo de paredes verdes para evaluar el efecto térmico mediante la temperatura de la superficie externa de la pared vertical en clima mediterráneo de Italia. Se construyeron tres prototipos: uno base y dos con plantas

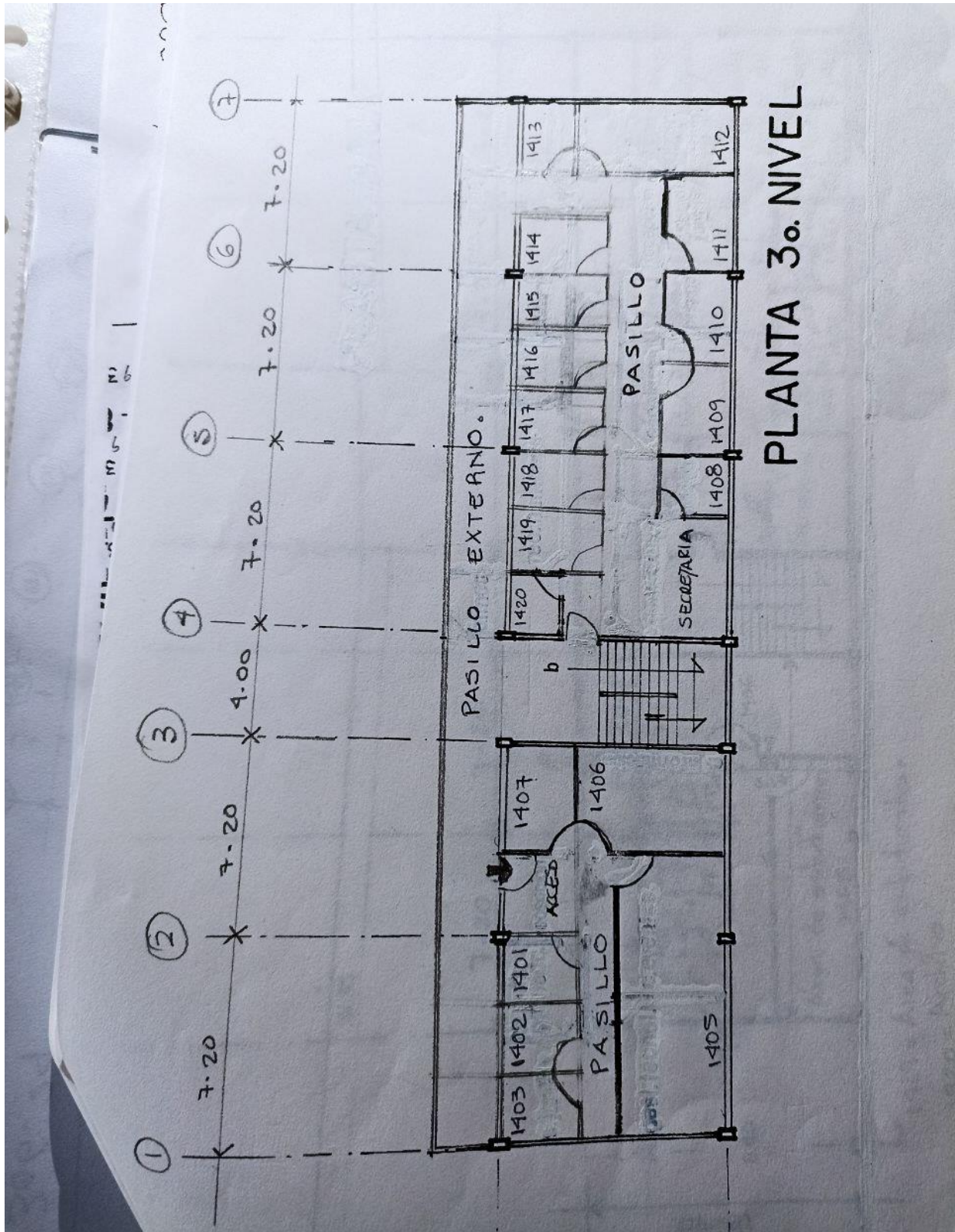
trepadoras de diferente especie (*Pandorea jasminoides abigarradas* y *Rhyncospermum jasminoides*) orientadas al sur, entre la vegetación y la pared hay un espacio de 11 cm. Las dimensiones de las paredes fueron de 1x1.55 m con 20 cm de grosor. La pared principal fue de ladrillos perforados con mortero y yeso, las otras paredes fueron de poliestireno expandido, ya que las celdas de pruebas no simulan una habitación a pequeña escala, su funcionamiento y ocupación no se consideró, las paredes solo intentan bloquear la radiación que incide en la pared sur, donde está la vegetación. Las mediciones se realizaron durante dos años y para identificar diferencias significativas entre la temperatura de la superficie de las paredes y evaluar la influencia de la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con software CoStat. Los resultados que se encontraron fue que la temperatura de la pared base siempre fue mayor que la temperatura de las paredes con vegetación, en promedio la temperatura disminuyó de 6-7 °C con la vegetación. El mayor efecto de enfriamiento ocurrió con una velocidad del viento de 3-4 m/s, una humedad relativa del aire dentro del rango 30-60% y una radiación solar superior a 800 W/m². La mitigación de la temperatura de la superficie de la pared debido a las plantas se observó durante todo el año y no se encontraron diferencias significativas entre las dos plantas.

C. Planos del edificio Unidad Académica 1 de Cenidet.







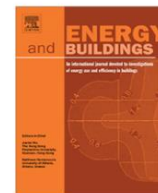


PLANTA 3o. NIVEL

D. Publicaciones

Se han realizado tres artículos durante el periodo doctoral. El primero se centró en la comparación un techo tradicional y un techo verde bajo condiciones climáticas de ocho ciudades de México. En el segundo se hizo una recopilación de los estudios sobre infraestructura verde (techos y paredes verdes) realizados en México. Y en el tercero se evaluó el desempeño térmico de un sistema de ventana con una cubierta de material de cambio de fase para dos climas de México. Los artículos mencionados se enumeran a continuación y las portadas de los mismos en la siguiente página.

1. Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico.
2. Research and development of green roofs and green walls in México: a review.
3. Thermal performance of a window shutter with a phase change material as a passive system for buildings in warm and cold climates of México



Thermal performance of a window shutter with a phase change material as a passive system for buildings in warm and cold climates of México

M. Che-Pan^{a,*}, E. Simá^a, A. Ávila-Hernández^a, J. Uriarte-Flores^b, R. Vargas-López^c

^a Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Prol. Av. Palmira S/N. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos CP 62490, Mexico

^b Laboratorio de Combustión, División de Termometría, Área Eléctrica, Centro Nacional de Metrología, Km 4.5 Carretera a Los Cués, Municipio El Marqués, C.P. 76246 Querétaro, Mexico

^c Universidad Autónoma de Guadalajara, Av. Patria 1201, Lomas del Valle, 45129 Zapopan, Jalisco, Mexico

ARTICLE INFO

Article history:

Received 15 October 2022

Revised 19 December 2022

Accepted 4 January 2023

Available online 7 January 2023

Keywords:

Thermal performance

Window shutter

Phase change material

Passive solar system

ABSTRACT

This paper shows the thermal performance of a window system with a shading cover made out of a phase change material (window-PCM shutter). The analysis was the numerical study where conjugated heat transfer was considered on the whole system window-PCM shutter. The modeling was conducted under warm (Merida) and cold weather (Toluca) conditions in México for the warmest and coldest day. Two different phase change materials (PCMs) were selected for the study: Paraffin wax - MG29 and *n*-octadecane. The results show that the *n*-octadecane and the MG29 were capable of keeping the inside comfort temperature for 14:35 and 16:23 h, respectively.

The *n*-octadecane and MG29 reduced the energy of the window-PCM shutter inside surface by 67.3 and 71.6%, respectively, compared to a conventional window. Under cold weather conditions also occurred reductions of heat fluxes by 87.2 (*n*-octadecane) and 83% (MG29) with the window-PCM shutter system compared to a conventional window, causing non-comfort temperatures. The use of a window-PCM shutter is highly recommended under warm weather conditions, given that it showed to be a viable option for energy savings in buildings; however, for its implementation under cold weather conditions of México, it becomes necessary further investigations with other PCMs.

© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

According to the national energy balance conducted by the Ministry of Energy of México (SENER) in 2020 the residential sector consumed 21.90 % of the total energy worldwide. In México, this sector represents 24.54 % of the total production, and part of this consumption is destined for air conditioning systems [1]. These systems improve the thermal comfort inside buildings since approximately 70 % of the Mexican territory has a warm climate (CONABIO) [2], which negatively affects thermal comfort. The idea of using environmentally friendly systems in buildings that work with solar energy arises to prevent the use of these air conditioning systems. The solar energy can be exploited by implementing passive solar systems. Among passive solar technologies, there are techniques focused on bioclimatic architecture. This bioclimatic

architecture consists of designing the components of the building envelope (roof, walls, windows, floor) by taking advantage of the naturally available resources, such as solar radiation, vegetation, rain, wind, and considering the weather conditions.

Among the different passive technologies used in windows are double-glazed windows, low emissivity, and reflective glass [3], with solar control film [4], among others. The windows and glass technologies have been investigated and developed to reduce room energy gains and losses. Some examples of the developed technologies are air gel, prismatic, vacuuming glasses, and phase change materials [5]. Recently the interest in using phase change material (PCM) has emerged since these materials can retain or store energy during the phase change process, which causes a delay in the energy that enters the building. Later, the stored energy is released when the weather conditions change during the day and night [6,7].

The implementation of PCM in windows has been widely studied in the last decades, showing favorable results in its thermal performance. For example, Ismail and Henriquez [8] performed an experimental-theoretical study of a double glass window filled with a PCM in the space between the glass sheets. The results

* Corresponding author.

E-mail addresses: miguelchepan@gmail.com (M. Che-Pan), efrain.sm@cenidet.tecnm.mx (E. Simá), araceli.avila17me@cenidet.edu.mx (A. Ávila-Hernández), uriarte.fj@hotmail.com (J. Uriarte-Flores), rogelio.vargas@edu.uag.mx (R. Vargas-López).



Review

Research and development of green roofs and green walls in Mexico: A review



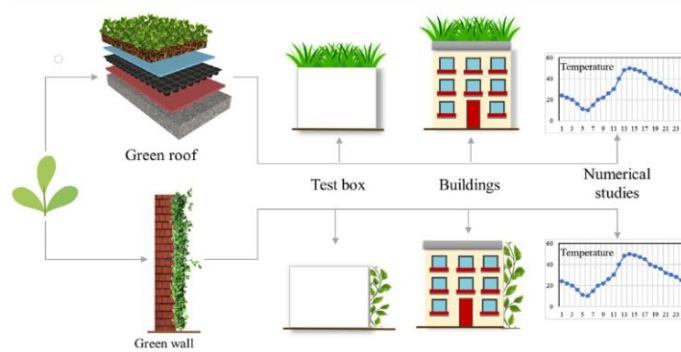
A. Ávila-Hernández*, E. Simá, M. Ché-Pan

Tecnológico Nacional de México/CENIDET, ProL. Av. Palmira S/N. Col. Palmira, Cuernavaca, Morelos CP 62490, Mexico

HIGHLIGHTS

- The importance of green roofs is to reduce energy consumption in buildings and the UHI effect.
- Thermal and energy behavior of green roofs and walls in the different climates of Mexico.
- Analysis of the development and panorama that Mexico has on green roofs and walls compared to the rest of the world.
- Review of the rules, incentives, and regulations of green roofs and walls.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Huu Hao Ngo

Keywords:

- Green roofs
- Green walls
- Urban heat island
- Energy saving
- Green infrastructure laws
- Thermal comfort

ABSTRACT

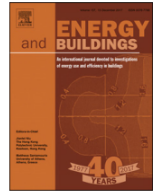
The residential sector is one of the primary energy consumers and emitters of greenhouse gases. Given the environmental problem, one of the methods of mitigating electricity consumption and reducing the temperature in buildings is green infrastructure: green roofs and walls. This article presents a compilation of the studies carried out in México about green infrastructure; the energy, thermal and environmental benefits obtained were analyzed according to the vegetation, substrate, climate, and systems configuration. In addition, the development of policies, laws, regulations, and incentives in the field of green roofs in Mexico was also analyzed. The results indicate that using green infrastructure can help mitigate greenhouse gases since a green roof can reduce the indoor temperature up to 19.9 °C, save 28 % annually in electricity consumption and remove 80 % of rainwater pollutants. Finally, the results of this research can provide insight for researchers, legislators, and urban planners about the state in which Mexico is located, as well as help in decision-making.

Contents

1. Introduction	2
2. Methodology	3
3. Characteristics of green infrastructure	3
3.1. Green roofs	3
3.2. Green walls	4

* Corresponding author.

E-mail addresses: araceli.avila17me@cenidet.edu.mx (A. Ávila-Hernández), efrain.sm@cenidet.tecnm.mx (E. Simá), miguelchepan@gmail.com (M. Ché-Pan).



Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico

A. Ávila-Hernández^a, E. Simá^a, J. Xamán^{a,*}, I. Hernández-Pérez^b, E. Téllez-Velázquez^a, M.A. Chagolla-Aranda^a

^a Tecnológico Nacional de México / CENIDET, Prol. Av. Palmira S/N. Col. Palmira. Cuernavaca, Morelos CP 62490, México

^b División Académica de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez km. 1, Cunduacán, Tabasco CP 86690, México

ARTICLE INFO

Article history:

Received 21 August 2019

Revised 27 November 2019

Accepted 17 December 2019

Available online 18 December 2019

Keywords:

Thermal performance

Energy consumption

Green roofs

Residential building

ABSTRACT

A thermal, environmental, and economic behavior study was performed for social housing in Mexico. This research focuses on the comparison between a traditional roof (TR) and a green roof (GR) under the weather conditions of eight cities in Mexico. The study was carried out by means of thermal simulations using the EnergyPlus software, which were validated with experimental data from two test boxes (TR and GR). For the validation of the simulations, the interior surface temperature and the heat flow of the roof of the test boxes were measured, and a maximum error of 3.55% and 2.17% was found for the interior surface temperature for the traditional and green roof, respectively. The results of the simulation showed that in locations with warm weather the GR reduced the indoor temperature of the house up to 4.7 °C. In locations with temperate weather, the GR reduced the cooling energy demand by up to 99%, and at the same time increased the heating energy demand by 25%. From the environmental study, it was found that the GR also reduced the CO₂ by 45.7%. In the economic part, the GR had a payback period of 8.8 years, which makes the implementation of the green roof viable.

© 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

The world's energy consumption until now has been mainly from fossil resources, according to the International Energy Agency (IEA), in 2015 oil and coal accounted for 60% of the worldwide energy sources, which were essentially used for generation of electricity [28]. Global emissions of carbon dioxide related to energy increased by 1.4% in 2017, after three years without changes, reaching a historical maximum of 32.5 gigatonnes [27]. Three major contributors of CO₂ related to the use of fossil fuels are the US, China, and India, which accounted for 70% of total emissions and in 2018 these countries experienced a decrease in their emissions mainly due to the use of renewable energy [29]. However, medium and small economies such as Turkey, Mexico, and Cyprus also contribute to emissions [47]. One of the most important sectors that contribute to emissions is the residential and commercial building sector; this sector worldwide consumes 21.9% of total energy,

and in Mexico the building sector is responsible of the 17.2% the total energy [45]. Currently, worldwide the residential and commercial building sector consumes approximately 60% of electricity, and this value in Latin America is 42% [8]. In Mexico, residential electricity consumption is mainly used by air conditioning systems, representing 21.2% of the national total [11]. For this reason, in order to mitigate polluting emissions and reduce electricity consumption in buildings, researchers around the world are analyzing different building technologies. Among these technologies, passive building techniques, which do not require electricity for their operation, are becoming increasingly attractive because they can be installed or implemented into the building envelope. Thermal insulation, smart glazing, wind tower, solar chimney, ventilated roofs, and green roofs are some examples of passive technologies. Another alternative to mitigate pollutants is through the use of renewable energy, which has expanded almost all over the world at an accelerated pace, it is expected that the world's electricity supply by wind generation in 2020 would be from 8% to 12% of the total supply [31,44].

The energy used to heat and illuminate a building can be saved by using one or several passive techniques, in particular, roofs occupy around 20–25% of urban surfaces, which represent an attractive part of improving the building envelope, as their perfor-

* Corresponding author.

E-mail addresses: ivan.hernandezp@ujat.mx (A. Ávila-Hernández), esima@cenidet.edu.mx (E. Simá), jxaman@cenidet.edu.mx (J. Xamán), ivan_tellez@live.com (E. Téllez-Velázquez), chagolla10m@cenidet.edu.mx (M.A. Chagolla-Aranda).