



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA –DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN EDIFICACIONES

**EFFECTO TÉRMICO DE LOS TECHOS VERDES EN UNA VIVIENDA BAJO
DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ALFREDO TOBIAS SALAS

TUTORES PRINCIPALES
SERGIO QUEZADA GARCÍA, FACULTAD DE INGENIERÍA
MARCO ANTONIO POLO LABARRIOS, UAM - CUAJIMALPA

CUIDAD UNIVERSITARIA, CUIDAD DE MÉXICO, OCTUBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Martín Del Campo Márquez Cecilia

Secretario: Dra. Escobedo Izquierdo M. Azucena

1 er. Vocal: Dr. Quezada García Sergio

2 do. Vocal: Dr. Polo Labarrios Marco Antonio

3 er. Vocal: M.I. Martínez Quintana Marco Antonio

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS:

SERGIO QUEZADA GARCÍA

FIRMA

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar el efecto térmico de un techo verde en una vivienda en las diferentes condiciones climáticas de México, por medio de la simulación para determinar si el techo verde contribuye a alcanzar condiciones de confort térmico y reducir el consumo de energía que se usa para la climatización de espacios. Para realizar la simulación de la vivienda se utiliza el programa EnergyPlus que permite realizar simulaciones energéticas de edificios. El estudio se realiza para una vivienda compuesta de dos pisos, se reporta los resultados para tres dormitorios, el dormitorio 1 se encuentra en la planta baja, mientras que los dormitorios 2 y 3 se ubican en el primer piso. El estudio se realiza para la vivienda localizada en las siguientes ciudades: Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro, Pachuca y Cancún. En las ciudades donde no es posible alcanzar condiciones de confort térmico con la implementación del techo verde, se analiza el ahorro de energía que se usa para la climatización en tres dormitorios de la vivienda.

En las ciudades estudiadas el techo verde logra reducir la temperatura interior de los tres dormitorios, siendo el dormitorio 1 que se encuentra en la planta baja el cual presenta la menor reducción de temperatura. El dormitorio 2 se presenta la mayor reducción de temperatura, ésta se da en la ciudad de Mexicali con una reducción máxima de 10.7 °C. El techo verde logra reducir el consumo de energía destinada a enfriar el dormitorio 2 un 46 % en la ciudad de Mexicali, esto representa que se evitan emitir 908.5 kg CO₂e anuales hacia la atmosfera. El techo verde logra reducir hasta 9.0 °C en el dormitorio 3 en la ciudad de Mexicali. Así mismo, el techo verde logra reducir el consumo anual de energía por refrigeración en el dormitorio 3 un 39.6 %, esto permite que se dejen de emitir 728.9 kg CO₂e anuales hacia la atmosfera.

En el caso de Querétaro y Guanajuato el techo verde es capaz de alcanzar un estado de confort térmico en los dormitorios en gran parte del año, debido a esto no se simuló la vivienda con un sistema de aire acondicionado y techo verde. Por el contrario, en Pachuca el techo verde repercute negativamente el confort térmico en los dormitorios ya que incrementa la sensación de frío que se tiene en ellos.

Índice general

Índice de figuras	vii	
Índice de tablas	xi	
1	Introducción	1
1.1	Sistemas pasivos	1
1.1.1	Estanque en el techo	2
1.1.2	Control solar	2
1.1.3	Inercia térmica	4
1.1.4	Ventilación	5
1.1.5	Muro Trombe	6
1.1.6	Enfriamiento evaporativo	6
1.1.7	Vegetación	7
1.1.7.1	Muro verde	8
1.1.7.2	Techo verde	8
1.2	Beneficios de los techos verdes	10
1.2.1	Escorrentía	10
1.2.2	Isla de calor	10
1.2.3	Ruido	10
1.2.4	Disminución del consumo de energía	10
1.2.5	Reducción temperatura interior	10
1.2.6	Purificación del aire	11
1.3	Objetivo	12
1.3.1	Objetivos específicos	12
2	Métodos	13
2.1	EnergyPlus	13
2.2	Descripción del modelo matemático del techo verde	14
2.2.1	Balance de energía en la capa verde	14
2.2.2	Balance de energía en el sustrato	15
2.3	Voto medio estimado	16
2.4	Caso de estudio	17
3	Resultados	31
3.1	Mexicali	31

3.2	Hermosillo	38
3.3	Monterrey	44
3.4	Tampico	50
3.5	Guanajuato	56
3.6	Querétaro	60
3.7	Pachuca	65
3.8	Cancún	71
4	Conclusiones	77
	Referencias	79

Índice de figuras

1.1	Estanque de agua en el techo.	2
1.2	Sistema skytherm.	2
1.3	Alero y louver horizontal como técnica de control solar.	3
1.4	Celosía moderna utilizada como control solar. Imagen de Sherif et al. (2012)	3
1.5	Onda de calor que se propaga a través de una pared. Imagen de Verbeke and Audenaert (2018)	4
1.6	Diagrama de chimenea solar.	5
1.7	Muro Trombe clasico y fotovoltaico.	6
1.8	Principio de trabajo del enfriamiento evaporativo directo.	7
1.9	Tecnologías verdes en edificios.	7
1.10	Sección transversal de un techo verde con sus múltiples capas.	9
1.11	Variación de la demanda energética de climatización de los edificios debido a la instalación de techos verdes en techos no aislados (Susca, 2019).	11
2.1	Ciudades estudiadas en este trabajo.	18
2.2	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Mexicali.	20
2.3	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Hermosillo.	21
2.4	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Monterrey.	22
2.5	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Tampico.	23
2.6	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Guanajuato.	24
2.7	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Querétaro.	25
2.8	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Pachuca.	26
2.9	Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Cancún.	27
2.10	Vista superior de la vivienda con dos pisos.	28
2.11	Vivienda de dos pisos con superficies adiabáticas.	29
2.12	Vivienda de dos pisos con su envolvente.	30

3.1	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Mexicali.	31
3.2	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Mexicali.	32
3.3	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Mexicali.	33
3.4	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Mexicali.	33
3.5	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Mexicali.	34
3.6	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Mexicali.	35
3.7	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Mexicali.	35
3.8	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Mexicali.	36
3.9	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Hermosillo.	38
3.10	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Hermosillo.	39
3.11	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Hermosillo.	39
3.12	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Hermosillo.	40
3.13	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Hermosillo.	40
3.14	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Hermosillo.	41
3.15	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Hermosillo.	41
3.16	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Hermosillo.	42
3.17	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Monterrey.	44
3.18	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Monterrey.	45
3.19	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Monterrey.	45
3.20	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Monterrey.	46
3.21	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Monterrey.	46
3.22	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Monterrey.	47
3.23	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Monterrey.	47

3.24	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Monterrey.	48
3.25	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Tampico.	50
3.26	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Tampico.	51
3.27	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Tampico.	51
3.28	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Tampico.	52
3.29	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Tampico.	52
3.30	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Tampico.	53
3.31	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Tampico.	53
3.32	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Tampico.	54
3.33	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Guanajuato.	56
3.34	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Guanajuato.	57
3.35	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Guanajuato.	57
3.36	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Guanajuato.	58
3.37	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Guanajuato.	58
3.38	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Guanajuato.	59
3.39	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Guanajuato.	59
3.40	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Guanajuato.	60
3.41	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Querétaro.	61
3.42	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Querétaro.	61
3.43	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Querétaro.	62
3.44	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Querétaro.	62
3.45	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Querétaro.	63
3.46	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Querétaro.	64

3.47	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Querétaro.	64
3.48	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Querétaro.	65
3.49	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Pachuca.	65
3.50	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Pachuca.	66
3.51	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Pachuca.	66
3.52	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Pachuca.	67
3.53	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Pachuca.	68
3.54	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Pachuca.	68
3.55	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Pachuca.	69
3.56	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Pachuca.	69
3.57	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Cancún.	71
3.58	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Cancún.	72
3.59	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Cancún.	72
3.60	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Cancún.	73
3.61	Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Cancún.	73
3.62	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Cancún.	74
3.63	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Cancún.	75
3.64	Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Cancún.	75

Índice de tablas

1.1	Clasificación de techos verdes (Raji et al., 2015).	9
2.1	Escala de sensación térmica de siete puntos.	16
2.2	Materiales de la envolvente, su espesor y propiedades térmicas.	29
2.3	Características de las ventanas y puerta.	29
2.4	Parámetros del techo verde.	30
3.1	Consumo de energía por climatización en Mexicali.	37
3.2	Consumo de energía por climatización en Hermosillo.	43
3.3	Consumo de energía por climatización en Monterrey.	49
3.4	Consumo de energía por climatización en Tampico.	55
3.5	Consumo de energía por climatización en Pachuca.	70
3.6	Consumo de energía por climatización en Cancún.	76

1

Introducción

En el quinto reporte de evaluación sobre el cambio climático, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) define la descarbonización como "Proceso mediante el cual los países u otras entidades tratan de lograr una economía con bajas emisiones de carbono o mediante el cual las personas tratan de reducir su consumo de carbono"(IPCC, 2014). Lograr las emisiones netas cero requerirá una descarbonización en varios sectores de las actividades humanas, uno de ellos es el sector de la edificación. El sector de la edificación es fundamental para mitigar el cambio climático debido a que sus actuales emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) representa una parte significativa del total mundial. En particular, los GEI procedentes de los edificios fueron en 2019 de 12 GtCO₂ eq que corresponde al 21 % de las emisiones mundiales de GEI de ese año (IPCC, 2022).

Los edificios energía neta cero (NZEB por sus siglas en inglés) se consideran una solución en la reducción de las emisiones de GEI. Un NZEB se define como un edificio con un rendimiento energético muy alto, en el que se requiere una cantidad casi nula -o muy baja- de energía, ésta debe de ser abastecida en la medida de lo posible por fuentes de energía renovables, producidas en el mismo lugar o en las cercanías (D'Agostino et al., 2021).

El proceso para pasar de un edificio convencional a un NZEB debe seguir dos etapas: la primera, una reducción de la demanda de energía mediante técnicas de ahorro energético y la segunda, un aumento del abastecimiento de energía mediante sistemas de energía renovable (Shirinbakhsh & Harvey, 2021);(Ahmed et al., 2022). Los sistemas de pasivos de refrigeración pueden contribuir a reducir el consumo energético en las edificaciones.

1.1 Sistemas pasivos

Las técnicas pasivas utilizan sumideros ambientales, como el material de construcción, el aire, el agua, el cielo nocturno, etc., para mitigar el aumento de la temperatura del edificio debido a fuentes de calor como el aire ambiente, la ganancia de calor solar directa o la ganancia de calor interna del edificio. Las técnicas pasivas pueden ayudar a mantener las condiciones de confort requeridas en el edificio con un consumo mínimo de energía (Bhamare et al., 2019).

Algunas técnicas pasivas de climatización son el uso de vegetación, estanque en el techo, control solar, masa térmica, ventilación nocturna, ventilación impulsada por el viento, ventilación, muro Trombe y enfriamiento evaporativo, por mencionar algunas. A continuación, se describen algunas de estas tecnologías.

1.1.1 Estanque en el techo

Los estanques en el techo proporcionan climatización a través de la evaporación indirecta, la transferencia de calor por convección y radiación. En estos procesos el estanque en el techo se enfría por convección en su superficie y por radiación de onda larga debido a la temperatura del cielo.

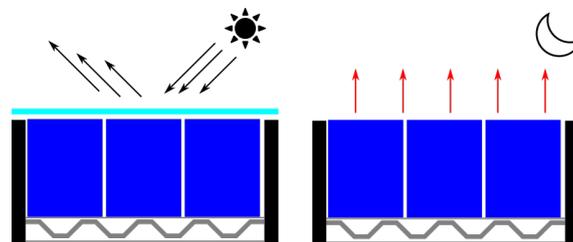


Estanque en el techo

Figura 1.1: Estanque de agua en el techo.

Khalifa (2017) mediante un modelo matemático estudió el efecto del estanque en el techo sobre la temperatura interior, el flujo de calor hacia el edificio, la distribución de la temperatura a través de las paredes y el techo. Los resultados mostraron que el uso del estanque en el techo puede reducir la temperatura media interior hasta 4 °C en comparación con un edificio que utiliza un techo convencional.

En el caso del Skytherm (Figura 1.1.3) se tiene una base metálica que mejora el enfriamiento por radiación hacia el cielo nocturno, mientras que su forma ondulada aumenta la superficie expuesta al cielo (Spanaki et al., 2011).



Skytherm

Figura 1.2: Sistema skytherm.

1.1.2 Control solar

La reducción de la radiación solar transferida a través de los componentes del edificio se denomina técnica de control solar (Bhamare et al., 2019). La radiación solar puede reducirse mediante el material del vidrio de las ventanas (Kumar et al., 2018) o desviar mediante el uso de elementos sombreadores (Kuhn, 2017).

Existen diferentes tecnologías que se utilizan en los vidrios, algunas de éstas son: vidrio multicapa (Garlisi et al., 2020), al vacío (Ali et al., 2017), electrocrómico (Lee et al., 2020), gasocrómico (Liang et al., 2019), fotoelectrocrómico (Cannavale et al., 2020) y termotrópico (Yao & Zhu, 2012).

Algunos elementos sombreadores son: aleros, louver horizontal (Nikolic et al., 2020) (Figura 1.3) y celosías (Figura 1.4) (Sherif et al., 2012).

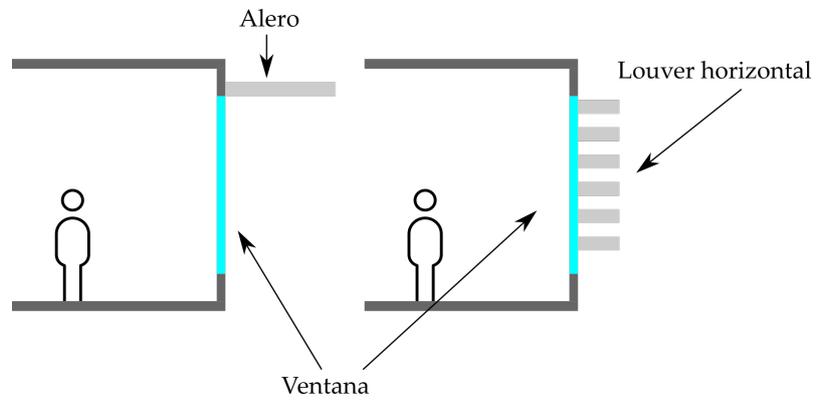


Figura 1.3: Alero y louver horizontal como técnica de control solar.



Figura 1.4: Celosía moderna utilizada como control solar. Imagen de Sherif et al. (2012)

1.1.3 Inercia térmica

La masa térmica se define como la capacidad de un material para absorber, almacenar y liberar calor. Los materiales de masa térmica, como el agua, suelo, ladrillos, madera, rocas, acero y el hormigón, actúan como disipadores de calor en los periodos cálidos y como fuentes de calor en los periodos fríos (Shafigh et al., 2018).

En una condición transitoria, la masa térmica de un edificio puede absorber, almacenar y liberar progresivamente calor en función de la diferencia de temperatura con el entorno circundante. La cantidad de calor almacenado depende de la densidad y del calor específico del material, mientras que la tasa de intercambio de calor está determinada por la conductividad térmica del material. Los edificios con una gran cantidad de masa térmica dentro de la envolvente, muestran una respuesta menor y más tardía al aumento de la temperatura exterior. Este comportamiento transitorio se denomina como la inercia térmica de un edificio (Verbeke & Audenaert, 2018).

Este fenómeno está relacionado con dos parámetros importantes, el tiempo de retraso y el factor de decrecimiento, que se representan gráficamente en la Figura 1.5. El tiempo de retraso es el tiempo necesario para que la onda de calor se transporte a través de una pared desde el exterior hasta el interior, mientras que el factor de decrecimiento es la razón decreciente de su amplitud durante este proceso.

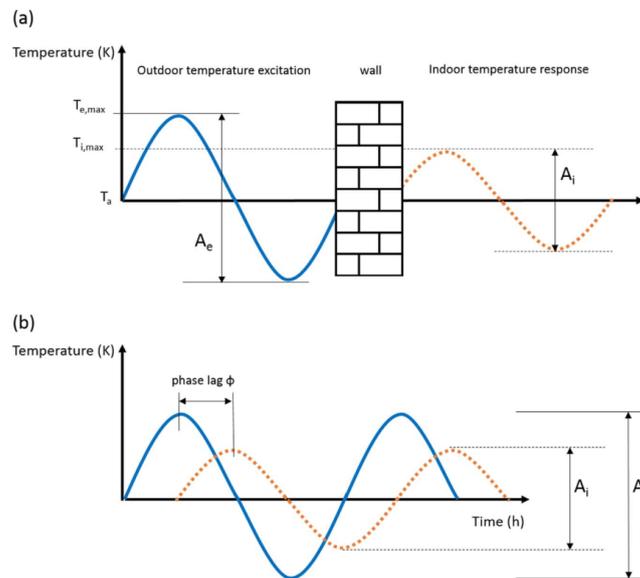


Figura 1.5: Onda de calor que se propaga a través de una pared. Imagen de Verbeke and Audenaert (2018)

La masa térmica puede ser benéfica para reducir la demanda de energía, los resultados de Nocente and Grynning (2020) demostraron un impacto positivo de la masa térmica en el uso de la energía, durante el experimento registraron una reducción de hasta el 44 % de la demanda energética debido al enfriamiento.

Una tecnología prometedora son los materiales de cambio de fase (PCM por sus siglas en inglés), la integración de PCM en las paredes, los techos y los suelos de los edificios puede aumentar la masa térmica de estos elementos, lo que no solo podría disminuir

la transferencia de calor durante las horas pico, sino también podría disminuir las fluctuaciones de la temperatura interior (Song et al., 2018).

Los PCMs utilizan el principio del almacenamiento térmico de calor latente para absorber energía en grandes cantidades cuando hay un excedente y liberarla cuando hay un déficit (Kalnæs & Jelle, 2015).

Xamán et al. (2020) describieron el comportamiento térmico de un techo de concreto con una capa de PCM en su superficie interior bajo un clima cálido en Mérida, México. Con un código numérico propio analizaron un techo con tres tipos de PCM considerando diferentes espesores. Sus resultados indicaron que el caso de un techo con PCM cera de parafina - MG29 con un espesor de 2 cm tuvo los valores más bajos de transferencia de calor durante el día más frío (204.5 W m^{-2}) y el más cálido 610.7 W m^{-2} ; dichos valores son hasta un 57 % inferiores a un techo convencional de concreto.

1.1.4 Ventilación

La incidencia del viento en la fachada de un edificio produce una presión positiva en el lado de barlovento¹ y una presión negativa relativa en el lado de sotavento². Esta diferencia de presión, así como las diferencias de presión en el interior del edificio, impulsan el flujo de aire. Mientras que el efecto de chimenea se debe a la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de los edificios. Cuando la temperatura interior del edificio es mayor que la exterior, el aire caliente del interior se eleva y sale, siendo sustituido por aire más frío y denso procedente de abajo.

Las chimeneas solares utilizan este efecto para la ventilación de edificios como un sistema pasivo de enfriamiento. Los factores externos más importantes que influyen en la construcción de chimeneas solares son: el clima, la orientación y la radiación solar (Nakielska & Pawłowski, 2017). Un esquema de una chimenea solar se presenta en la Figura 1.6, durante el día, el sol proporciona un flujo de calor adicional al aire, aumentando su temperatura y causando una disminución de su densidad, obligando al aire más caliente a fluir hacia arriba.

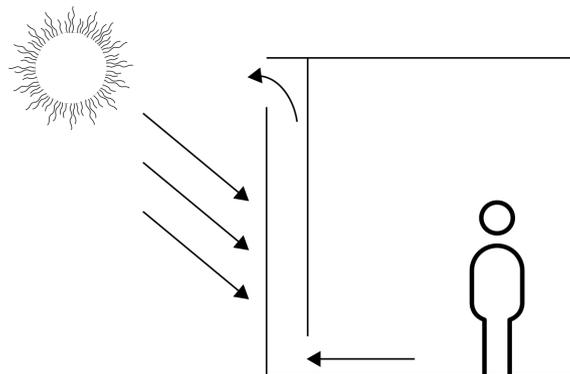


Figura 1.6: Diagrama de chimenea solar.

¹Parte de donde viene el viento, con respecto a un punto o lugar determinado (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, n.d.-a).

²La parte opuesta a aquella de donde viene el viento con respecto a un punto o lugar determinado (REAL ACADEMIA ESPAÑOLA, n.d.-b).

También existe la ventilación nocturna, que consiste en una forma indirecta de enfriamiento en la que el edificio se ventila con aire ambiente más frío durante la noche para enfriar sus elementos estructurales. La envolvente fría puede entonces absorber los flujos de calor al día siguiente y proporcionar confort, reduciendo el aumento de la temperatura del aire interior y de las paredes (Bakhtiari et al., 2020).

1.1.5 Muro Trombe

Un muro Trombe (Figura 1.7) es un sistema solar pasivo usado en la fachada de un edificio para acumular calor, calentar o enfriar un espacio interior (Hu et al., 2017). Cuando se implementan los muros Trombe en un edificio, el ahorro anual de energía consumida por calefacción es de alrededor del 20 % (Bojić et al., 2014). Entre los muros Trombe para enfriar existe la pared evaporativa de cerámica, muro Trombe clásico, muro Trombe fotovoltaico y el muro Trombe en combinación con una chimenea solar (Hu et al., 2017).

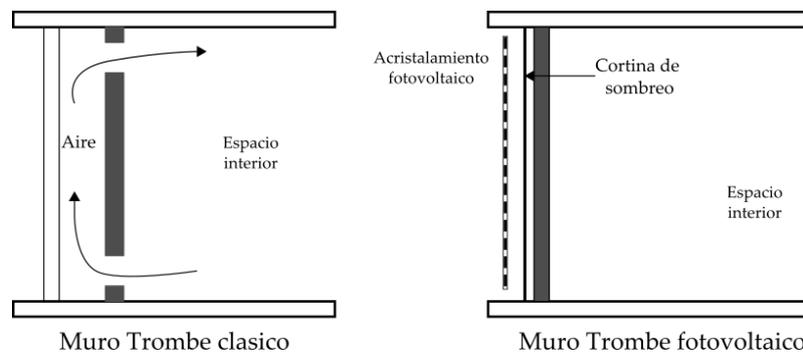


Figura 1.7: Muro Trombe clasico y fotovoltaico.

El funcionamiento del muro Trombe depende de varios factores como las propiedades térmicas del muro (Li et al., 2019), el tipo de acristalamiento y sus propiedades (Zhu et al., 2019), velocidad del viento, radiación solar y su entorno climático (Zhou et al., 2019).

1.1.6 Enfriamiento evaporativo

El enfriamiento evaporativo es un concepto de enfriamiento conocido y antiguo por el que se produce el enfriamiento debido a la evaporación del vapor de agua en el aire de proceso. Estos sistemas se suelen clasificar como directos, indirectos y sistemas de enfriamiento evaporativa de ciclo Maisotsenko (Noor et al., 2020).

Dado que su potencial depende en gran medida de las condiciones higrotérmicas del aire, se utilizan tradicionalmente en climas secos y cálidos con humedad baja (Velasco-Gómez et al., 2020).

El enfriamiento evaporativo directo es el tipo más simple de enfriamiento evaporativo. El aire exterior que se va a enfriar entra en contacto directo con el agua. El aire se enfría cambiando el calor sensible por el calor latente (Sofia & Putra, 2020), en la Figura 1.8 se muestra esta tecnología.

El rendimiento de un sistema de enfriamiento evaporativo directo depende primordialmente de la humedad y temperatura del aire, así como de la velocidad del ventilador principal (Elahi & Farhani, 2021).

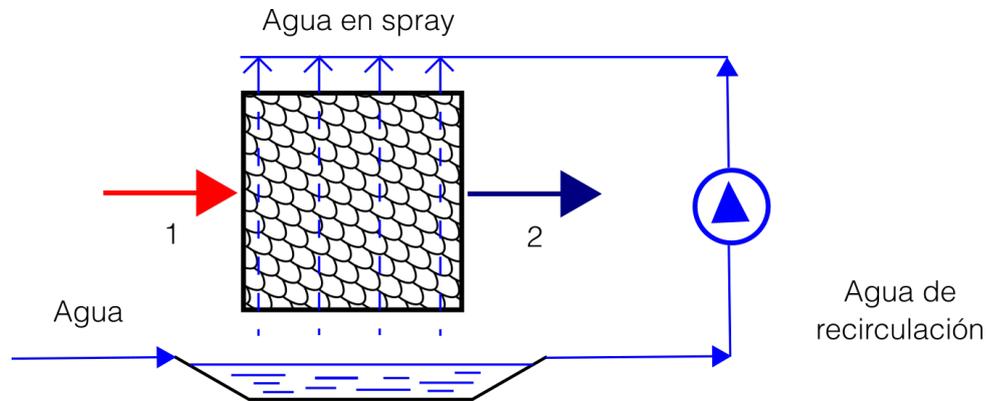


Figura 1.8: Principio de trabajo del enfriamiento evaporativo directo.

1.1.7 Vegetación

Hay una cantidad considerable de estudios, que evalúan el impacto del uso de vegetación externa al edificio para mejorar la sensación térmica que se experimenta al aire libre con unas condiciones de verano caliente (Lin et al., 2017). Hsieh et al. (2018) sugieren que la adición de árboles alrededor de un edificio puede llevar a una reducción máxima del 15.2% del consumo de energía debido a los beneficios del sombreado y transpiración de los árboles. Los lugares más comunes donde se encuentra la vegetación interna de un edificio son el techo verde, muro verde, terrazas verdes y el empleo de plantas de interior en atrios, especialmente en los rascacielos (Raji et al., 2015), como se muestra en la Figura 1.9.

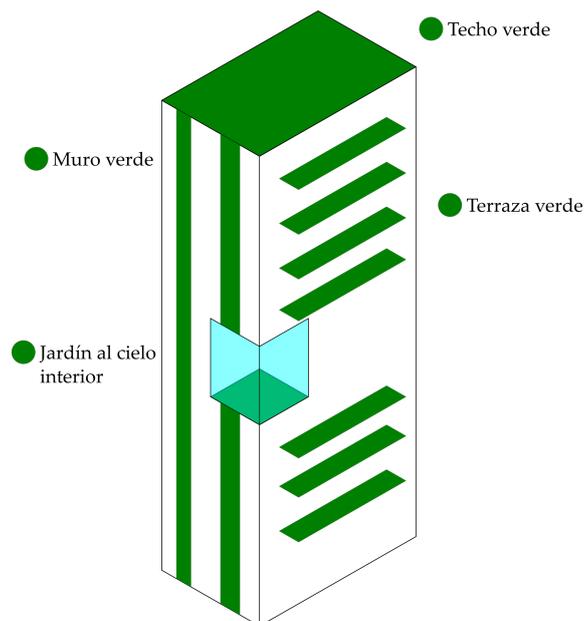


Figura 1.9: Tecnologías verdes en edificios.

1.1.7.1 Muro verde

Un muro verde también conocido como un sistema verde vertical (Wong et al., 2009), se refiere a todos los sistemas que permiten reverdecer una superficie vertical de un edificio con una selección de especies de plantas (Manso & Castro-Gomes, 2015).

Los tres factores principales que determinan el impacto de la tecnología de los muros verdes como técnica pasiva de enfriamiento en un edificio son: el efecto del color de la vegetación y el sustrato a través de la evapotranspiración, el aislamiento térmico a través de la creación de un entorno de microclima entre el follaje y la envolvente del edificio y el sombreado debido a la capa de vegetación (Raji et al., 2015).

Sendra-Arranz et al. (2020) analizaron la influencia de la orientación de un muro verde en su capacidad para reducir las temperaturas superficiales en un clima mediterráneo. Los autores utilizaron un sistema de control en tiempo real, con una base de datos del clima de tres años de mediciones. Los resultados mostraron que, en promedio, la temperatura de control es mayor que la de la pared verde, con diferencias máximas de 20 °C en verano y 8 °C en invierno en la superficie de la pared sur.

Widiastuti et al. (2020) realizaron tres estudios experimentales con una cobertura del muro verde de 0 %, 50 % y 90 % con un modelo de edificio a escala en tres días de diciembre, en un país tropical. Tuvo una reducción máxima de 1.9 °C en la temperatura del espacio interior usando el muro verde con una cobertura del 90 %. Sin embargo, la media de la humedad relativa en el interior del edificio aumentó hasta el 72.5 % debido a la evapotranspiración y afectó al confort térmico interior.

Nan et al. (2020) estudiaron el efecto de las paredes verdes en el ambiente térmico interior en invierno, a bajas temperaturas y altos niveles de humedad. Se dispusieron cuatro contenedores con diferentes fachadas exteriores en Hangzhou y se efectuó un análisis comparativo de los cambios en los ambientes térmicos internos y externos de estos contenedores. Los resultados revelaron que tanto las macetas llenas de tierra como las plantas colocadas en la pared verde desempeñan un papel importante en el aislamiento térmico interior.

Cuando las paredes orientadas al norte de los contenedores estaban equipadas con macetas, una pared verde de bambú o una pared verde con diferentes plantas, las temperaturas interiores eran 0.4 °C, 1.7 °C y 1 °C más altas durante la noche, en relación con las del contenedor de referencia.

1.1.7.2 Techo verde

Un techo verde, también conocido como techo con vegetación (Cook-Patton & Bauerle, 2012) o techo vivo (Fassman-Beck et al., 2013), se refiere a todos los sistemas que proporcionan el reverdecimiento de los techos permitiendo el crecimiento de diferentes tipos de vegetación en la parte superior de los edificios (Shafique et al., 2018).

Los techos verdes pueden clasificarse principalmente en techos verdes extensivos e intensivos (Maiolo et al., 2020)(Brucker Juricic et al., 2021), en la Tabla 1.1 se muestran las diferencias entre estos dos tipos de techos verdes.

Un techo verde se compone de las siguientes capas (Fig. 1.10):

- Sustrato, constituye la base del crecimiento de las plantas y debe de tener una gran capacidad de permitir el crecimiento de las raíces. Esto requiere

Tabla 1.1: Clasificación de techos verdes (Raji et al., 2015).

	Techo verde extensivo	Techo verde intensivo
Mantenimiento	Bajo	Alto
Riego	No	Periódicamente
Tipo de plantas	Musgo-Sedum-Hierbas	Plantas perennes, arbustos y árboles
Altura del sistema	60 - 200 mm	150 - 400 mm
Peso	60 - 150 kg/m ²	180 - 500 kg/m ²
Costo	Bajo	Alto

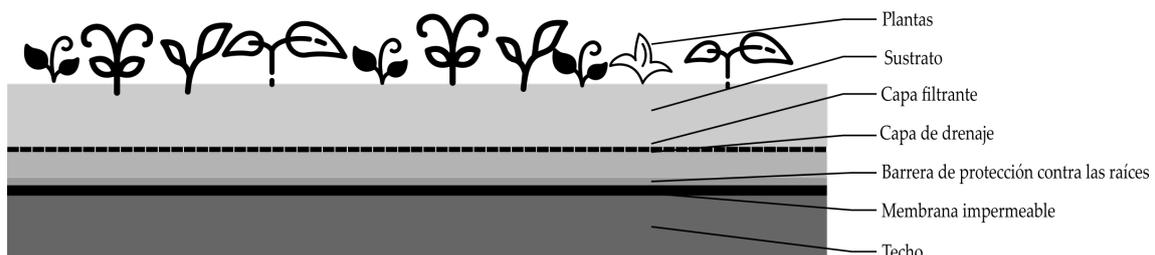


Figura 1.10: Sección transversal de un techo verde con sus múltiples capas.

unas propiedades físicas, químicas y biológicas específicas. El estrato vegetativo deber ser estructuralmente estable, almacenar el agua de infiltración disponible para las plantas y liberar únicamente el agua sobrante.

- **Capa filtrante:** impide que las partes más finas de la tierra y del sustrato se deslicen desde la vegetación hacia la capa de drenaje.
- **Capa de drenaje:** absorbe el exceso de agua debido a su estructura hueca y la conduce a los desagües del techo. Con los materiales de construcción adecuados, también sirve de almacenamiento de agua, aumenta el espacio apto para las raíces y asume una función protectora para la estructura subyacente.
- **Barrera de protección contra las raíces:** debe evitar permanentemente los daños en la impermeabilización causados por la penetración de las raíces de las plantas y, eventualmente, de los rizomas.
- **Membrana impermeable:** sirve para proteger la impermeabilización del techo.

1.2 Beneficios de los techos verdes

1.2.1 Escorrentía

Los techos verdes se consideran una solución prometedora basada en la naturaleza para la gestión de las aguas pluviales urbanas (Zhang et al., 2021). Estos son una medida probada para aumentar la evapotranspiración a expensas de escorrentía, complementando así los esfuerzos contemporáneos de gestión de las aguas pluviales para minimizar las inundaciones pluviales en las ciudades (Förster et al., 2021).

1.2.2 Isla de calor

Los techos verdes pueden ser soluciones adecuadas de reverdecimiento urbano, ya que no tienen un impacto negativo sobre el efecto de isla de calor urbana superficial durante el invierno, proporcionan enfriamiento durante el verano y contribuyen al aislamiento de los edificios lo que permite ahorrar energía destinada al acondicionamiento de aire, en los edificios (Stella & Personne, 2021).

El uso de técnicas pasivas para la mitigación el efecto de isla de calor urbana, y en particular los pavimentos fríos y los techos verdes, puede contribuir a la reducción del desconfort térmico en las zonas urbanas altamente pobladas; también pueden garantizar la reducción del consumo de energía y de las emisiones de gases de efecto invernadero (Battista et al., 2021).

1.2.3 Ruido

Los techos verdes pueden funcionar como absorbentes para mitigar el ruido del tráfico. Varias propiedades como la porosidad son importantes para la absorción y dispersión del sonido en entornos urbanos. El sustrato es el principal contribuidor a la absorción acústica de los techos verdes (Liu et al., 2021).

1.2.4 Disminución del consumo de energía

Susca (2019) realizaron una revisión geográfica de los posibles beneficios energéticos en los edificios derivados de la instalación de techos verdes. En la Figura 1.11 se muestra la instalación de techos verdes en techos no aislados, en todas las zonas climáticas de las que se tienen datos el techo verde resulta en un efecto beneficioso sobre la demanda de energía de enfriamiento. En particular, en la zona ecuatorial con invierno seco (Aw), en los climas templados cálidos, totalmente húmedos y con verano caluroso (Cfa), en el clima templado cálido con invierno seco y verano cálido (Cwb), y en el clima templado cálido con verano seco y caluroso (Csa).

1.2.5 Reducción temperatura interior

Ávila-Hernández et al. (2020) simularon en EnergyPlus el comportamiento térmico de un techo convencional y un techo verde en ocho ciudades de México. De sus resultados de la simulación anual, las ciudades con las reducciones más significativas

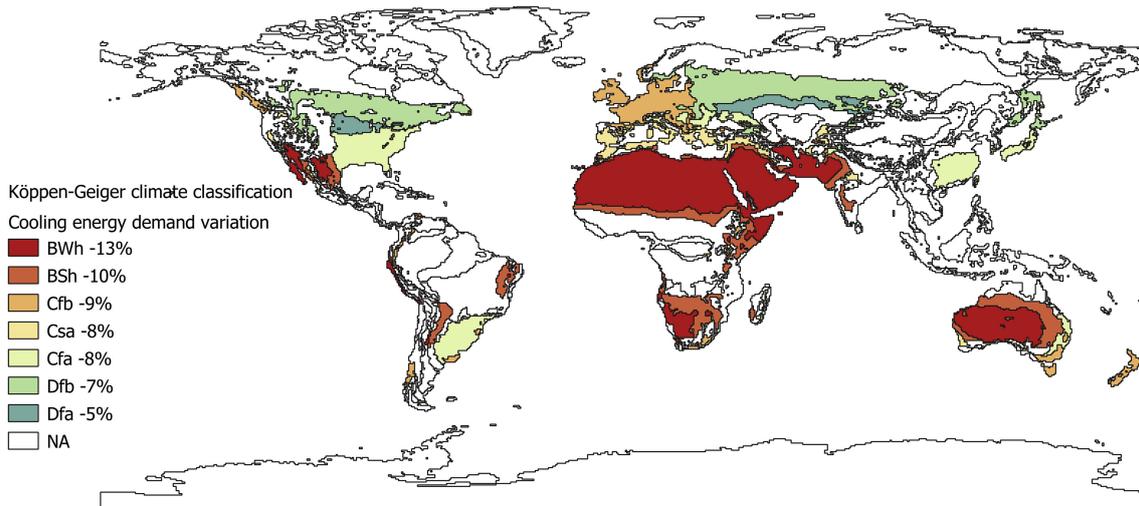


Figura 1.11: Variación de la demanda energética de climatización de los edificios debido a la instalación de techos verdes en techos no aislados (Susca, 2019).

para la temperatura media interior fueron Hermosillo con 4.7°C y La Paz con 3.2°C en cambio, Monterrey fue la ciudad con la menor disminución, con 2.2°C .

Lei et al. (2019) llevaron a cabo un experimento a escala real en un edificio escolar de Taipéi para investigar el beneficio de los techos verdes. Sus resultados mostraron que los techos verdes tienen poco efecto como aislante en invierno, pero un importante efecto de enfriamiento en verano, que podría reducir la temperatura interior hasta 4°C , en comparación con un techo convencional.

1.2.6 Purificación del aire

Speak et al. (2012) cuantificaron el potencial de captación de partículas menores de $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) para cuatro especies de plantas utilizadas en techos verdes. El potencial de *Sedum album L.* para la captación de PM_{10} fue $0.42\ \text{g m}^{-2}\ \text{año}^{-1}$ de $0.49\ \text{g m}^{-2}\ \text{año}^{-1}$ para *Plantago lanceolata*, en comparación con $1.81\ \text{g m}^{-2}\ \text{año}^{-1}$ y $3.21\ \text{g m}^{-2}\ \text{año}^{-1}$ de *Agrostis stolonifera L.* y *Festuca rubra L.* respectivamente.

Yang et al. (2008) investigaron el nivel de eliminación de la contaminación del aire por los techos verdes en Chicago mediante un modelo de deposición. Sus resultados mostraron que $19.8\ \text{ha}$ de techos verdes eliminaban un total de $1675\ \text{kg}$ de contaminantes atmosféricos en un año, de los cuales el O_3 representaba el 52 %, NO_2 (27 %), PM_{10} (10 %) y SO_2 (7 %).

1.3 Objetivo

Analizar el efecto térmico de un techo verde en una vivienda bajo diferentes condiciones climáticas de México, mediante simulación para determinar si contribuyen a alcanzar condiciones de confort térmico y disminuir el consumo de energía destinado a climatización.

1.3.1 Objetivos específicos

- Escoger el diseño de una vivienda.
- Recopilación de información para realizar simulaciones energéticas en edificaciones.
- Escoger los climas donde se va a evaluar el efecto térmico de los techos verdes.
- Determinar el efecto de los techos verdes.
- Determinar las condiciones de confort en los climas elegidos.
- Determinar si es necesario el uso de un sistema de acondicionamiento de aire.
- Determinar los espacios que requieren climatizar.
- Determinar el ahorro de energía debido a la implementación del techo verde destinada a la climatización.
- Análisis de datos.
- Discusión de resultados.

2

Métodos

En este trabajo se evalúa el comportamiento térmico de un edificio en diferentes condiciones climáticas con un techo convencional y con el uso de vegetación en su techo. Para esto se utilizó el programa de simulación energética en edificaciones EnergyPlus.

2.1 EnergyPlus

EnergyPlus es un programa de simulación energética de edificios que permite modelar el consumo de energía para la climatización, ventilación, iluminación y uso del agua en los edificios. Se ha desarrollado desde 1997 y fue publicado por primera vez en 2001. Tiene sus orígenes en los programas DOE-BLAST y DOE-2 (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) los cuales fueron difundidos a finales de los años 70 y principios de los años 80, como herramientas de simulación de energía. Sus capacidades eran el dimensionamiento de los equipos HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) y optimizar el uso de energía.

EnergyPlus es una de las herramientas de simulación energética de edificaciones más robustas y empleadas, tanto a nivel académico como comercial. Es de código abierto (<https://github.com/NREL/EnergyPlus>), su descarga es gratuita (<https://energyplus.net/downloads>) y tiene compatibilidad con los sistemas operativos Windows, Linux y Mac.

Algunas capacidades de EnergyPlus son:

- Pasos de tiempo inferiores a una hora, para la interacción entre zonas térmicas y el ambiente exterior.
- Técnica de solución que se basa en el balance térmico para las cargas térmicas del edificio que permite el cálculo simultáneo de los efectos radiantes y convectivos en las superficies interior y exterior durante cada paso de tiempo.
- Conducción de calor en estado transitorio a través de los elementos del edificio como paredes, techo o suelos.
- Modelos de confort térmico basados en la actividad, humedad, temperatura del bulbo seco, etc.
- Cálculos avanzados de ventanas, que incluyen persianas controlables, vidrio electrocrómico, vidrio termocrómico, ventanas con doble vidrio y una base de datos de ventanas comerciales.
- Sistemas de control de la iluminación natural, incluyendo los cálculos de la intensidad luminosa interior y el efecto de la iluminación artificial en la climatización.

- Un modelo de transferencia de calor para techos verdes que toma en cuenta el intercambio de radiación de onda larga y onda corta, los efectos del techo verde en la transferencia por convección, la evapotranspiración del suelo-plantas y la conducción del calor en la capa de suelo.

Para realizar las simulaciones se necesitan las condiciones climatológicas del lugar de interés, el archivo meteorológico de EnergyPlus (EPW por sus siglas en inglés) contiene estos datos meteorológicos de cada hora del día durante una fecha de interés. Estos datos son la temperatura del bulbo seco, humedad relativa, presión atmosférica y radiación global horizontal por nombrar algunos. Para la descarga de estos archivos una fuente es onebuilding (*climate.onebuilding.org*, n.d.).

Los datos meteorológicos para los programas de simulación energética como EnergyPlus se pueden dividir en dos categorías: datos históricos y años meteorológicos típicos (TMY por sus siglas en inglés). Los datos históricos son datos medidos de un lugar en particular para un periodo establecido. Por otra parte, los años meteorológicos típicos son una compilación de datos del clima representativos de un lugar, estos están compuestos por datos de diferentes años.

2.2 Descripción del modelo matemático del techo verde

El modelo matemático de transferencia de calor implementado en EnergyPlus consiste en dos balances de energía, uno en la capa verde (Ecuación 2.1) y otro para el sustrato (Ecuación 2.5).

2.2.1 Balance de energía en la capa verde

En el balance de energía en la capa verde incluye a la radiación por onda corta y onda larga, el flujo de calor por radiación, convección y transpiración, el flujo de calor neto en la capa verde está dado por:

$$q_c = \sigma_p(q_{sr} + q_{lr}) + q_{lr,s-c} + q_{cv,a-p} + q_{tr} \quad (2.1)$$

donde q_c es flujo de calor neto en la capa verde, el término $\sigma_p(q_{sr} + q_{lr})$ es la transferencia de calor por radiación de onda corta y larga, σ_p es la fracción de recubrimiento vegetal, que es la relación entre la superficie del suelo sombreada y la superficie total del suelo. q_{sr} es la ganancia de calor por radiación de onda corta, q_{lr} es la ganancia de calor por radiación de onda larga, $q_{lr,s-c}$ es la transferencia de calor por radiación desde el sustrato a la capa verde, $q_{cv,a-p}$ es la transferencia de calor por convección desde el aire a la capa verde y q_{tr} es la transferencia de calor por transpiración.

Flujo de calor por radiación térmica en la capa verde

En esta ecuación se considera la radiación de onda corta, la radiación de onda larga, y el intercambio por emisión entre las plantas y el sustrato

$$(q_{sr} + q_{lr} + q_{em})_c = \sigma_p(q_{sri}(1 - \sigma_p) + \epsilon_p q_{lri} - \epsilon_p T_p^4) + \frac{\sigma_p \epsilon_s \epsilon_p \sigma}{\epsilon_s + \epsilon_p - \epsilon_p \epsilon_s} (T_s^4 - T_p^4) \quad (2.2)$$

donde q_{em} es el calor por emisión, q_{sri} es el calor por radiación de onda corta incidente, el término $q_{sri}(1 - \sigma_p)$ toma en cuenta la radiación de onda incidente, $\epsilon_p q_{lri}$ y $\epsilon_p T_p^4$ es el intercambio de calor por emisión entre la planta y el aire, $\frac{\sigma_p \epsilon_s \epsilon_p \sigma}{\epsilon_s + \epsilon_p - \epsilon_p \epsilon_s} (T_s^4 - T_p^4)$ es el intercambio por emisión entre las plantas y el sustrato, ϵ_p es la emisividad de la planta, q_{lri} es el calor por radiación de onda larga incidente, T_p es la temperatura de la planta, ϵ_s es la emisividad del sustrato, σ es la constante de Stefan–Boltzmann y T_s es la temperatura del sustrato.

Transferencia de calor por convección

La transferencia de calor por convección entre el aire del ambiente y la capa verde depende de su diferencia de temperatura, velocidad del viento y el índice de área foliar (LAI por sus siglas en inglés), que se define como el área foliar por unidad de la superficie del suelo.

$$q_{cv} = 1.1LAI\rho_c C_p C_f v (T_a - T_p) \quad (2.3)$$

En esta ecuación, la constante 1.1 considera la transferencia de calor de los tallos y ramas (Deardorff, 1978). ρ_c es la densidad del aire a la temperatura de la capa verde, C_p es el calor específico del aire a presión constante ($1005.6 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$), C_f es un coeficiente de transferencia de calor adimensional que considera ambos lados de la hoja, y v es la velocidad del viento en la capa verde.

Transferencia de calor por transpiración

Las plantas proporcionan un efecto de enfriamiento debido al fenómeno de transpiración, su flujo de calor está dado por:

$$q_{tr} = \lambda LAI \rho_c C_f v r'' (q_{af} - q_{f,sat}) \quad (2.4)$$

donde λ es el calor latente de vaporización, r'' es un factor de humedad superficial, q_{af} es la proporción de mezcla del aire dentro de la capa verde y $q_{f,sat}$ es la relación de mezcla saturada a la temperatura de la capa verde.

2.2.2 Balance de energía en el sustrato

El flujo de calor neto en el sustrato incluye a la radiación de onda corta y onda larga que penetra a través de la vegetación, el flujo de calor por convección y transpiración, así como el flujo de calor por conducción a través del sustrato, esto se representa por:

$$q_s = (1 - \sigma_p)(q_{sr} + q_{lr}) - q_{lr,s-c} + q_{cv,a-s} + q_{ep} + k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (2.5)$$

En el caso del sustrato, q_s es flujo de calor neto en el sustrato, $q_{cv,a-s}$ es la transferencia de calor por convección desde el aire que contiene la capa verde al sustrato, q_{ep} es la transferencia de calor por evaporación y $k_s \frac{\partial T_s}{\partial z}$ es la transferencia de calor por conducción en el sustrato.

Flujo de calor por radiación térmica en el sustrato

Como en el caso de la capa verde (Ecuación 2.2), esta ecuación considera la radiación de onda corta, la radiación de onda larga y el flujo de calor neto debido a la emisión entre las plantas y el sustrato.

$$(q_{sr} + q_{lr} + q_{em})_s = (1 - \sigma_p)[q_{sri}(1 - \sigma_s) + \epsilon_s q_{lri} - \epsilon_s T_s^4] + \frac{\sigma_p \epsilon_s \epsilon_p \sigma}{\epsilon_s + \epsilon_p - \epsilon_p \epsilon_s} (T_s^4 - T_p^4) \quad (2.6)$$

Transferencia de calor por convección al sustrato

El intercambio de calor por convección entre el aire contenido en la capa verde y el sustrato está dado por

$$q_{cv,a-s} = \rho_s C_{p_a} C_{hg} v (T_a - T_s) \quad (2.7)$$

donde ρ_s es la densidad del aire a la temperatura del sustrato, C_{hg} es el coeficiente de calor cerca del sustrato (Frankenstein & Koenig, 2004).

Este modelo matemático es útil para determinar el flujo de calor del exterior hacia el interior de la edificación, también es útil para determinar la temperatura interior de la edificación que es importante ya que es la variable que mayor impacto tiene sobre el confort térmico. La mayoría de la gente se siente cómoda en el rango de temperatura que va de los 22°C a los 27°C, sin embargo, el confort térmico depende de la actividad física que se esté realizando, de la ropa que se lleve puesta, de la edad, del sexo, de las condiciones climáticas a las que estén acostumbradas las personas, etc. Otra medida para determinar el confort térmico es el voto medio estimado.

2.3 Voto medio estimado

El voto medio estimado (PMV por sus siglas en inglés) es un indicador que pretende conocer el valor medio de los votos de un grupo de personas en una escala de sensación térmica de 7 puntos (Tabla 2.1) (Fanger et al., 1970). Para el cálculo del PMV se debe de usar la Ecuación 2.8.

Tabla 2.1: Escala de sensación térmica de siete puntos.

+3	Caliente
+2	Cálido
+1	Ligeramente cálido
0	Neutro
-1	Ligeramente frío
-2	Frío
-3	Frío

$$\begin{aligned}
 \text{PMV} = & \left[0.303 \cdot \exp(-0.036 \cdot M) + 0.028 \right] \cdot \\
 & \left\{ (M - W) - 3.05 \cdot 10^{-3} \cdot \left[5733 - 6.99 \cdot (M - W) - p_a \right] - 0.42 \cdot \left[(M - W) - 58.15 \right] \right. \\
 & - 1.7 \cdot 10^{-5} \cdot M(5867 - p_a) - 0.0014 \cdot M \cdot (34 - T_a) \\
 & \left. - 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \left[(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \right\}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

Donde, M es la tasa metabólica en W m^{-2} , W es la potencia mecánica en W m^{-2} , p_a es la presión parcial del vapor de agua en Pa, T_a es la temperatura del aire en $^{\circ}\text{C}$, f_{cl} es la relación entre las áreas de superficie del cuerpo vestida y desnuda, T_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa en $^{\circ}\text{C}$, \bar{T}_r es la temperatura radiante media en $^{\circ}\text{C}$ y h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$.

Para la determinación de la temperatura de la superficie de la ropa se utiliza,

$$\begin{aligned}
 T_{cl} = & 35.7 - 0.028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3.96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(T_{cl} + 273)^4 \right. \right. \\
 & \left. \left. - (\bar{T}_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \cdot h_c \cdot (T_{cl} - T_a) \right\}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

donde I_{cl} es el aislamiento de la ropa en $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ también puede ser expresada en unidades *clo* donde 1 clo es equivalente a $0.155 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1}$.

Para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección se utiliza,

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0.25} & \text{para } 2.38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0.25} > 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}}. \\ 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2.38 \cdot |T_{cl} - T_a|^{0.25} < 12.1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \tag{2.10}$$

donde v_{ar} es la velocidad relativa del aire en m s^{-1} .

Finalmente, para el cálculo de la relación entre las áreas de superficie del cuerpo vestida y desnuda se utiliza,

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1} \\ 1.05 + 0.645 I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \text{K W}^{-1} \end{cases} \tag{2.11}$$

2.4 Caso de estudio

En este trabajo se analiza el efecto térmico que tiene la implementación de un techo verde sobre la temperatura de tres dormitorios, esto se realiza para las condiciones climáticas de Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro,

Pachuca y Cancún. Posteriormente se determina si la implementación del techo verde contribuye a alcanzar las condiciones de confort térmico para cada ciudad. Si con la implementación de un techo verde no es posible alcanzar las condiciones de confort térmico dentro de los dormitorios, se analiza el posible ahorro de energía destinado a climatizar los dormitorios, es decir se realiza un nuevo caso de estudio donde se considera el uso de aire acondicionado para la vivienda con techo convencional y techo verde.

Resumen de las ubicaciones estudiadas

Debido a que México tiene diferentes tipos de condiciones climáticas en su territorio en las costas con un clima cálido-húmedo, en el centro tiene un clima templado y en el norte un clima cálido-seco. Debido a esto, se escogieron ocho ciudades que abarcan estas condiciones climatológicas de México. Estas ocho ciudades son: Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro, Pachuca y Cancún. Estas ciudades se muestran la Figura 2.1.



Figura 2.1: Ciudades estudiadas en este trabajo.

A continuación, se describen brevemente las ciudades en donde se realizan las simulaciones. En las Figuras 2.2-2.9 se muestran las gráficas con la temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal global a cada hora del lugar de interés. La línea continua es el promedio diario de la variable.

Mexicali con coordenadas 32.62, -115.45 , una elevación de 22.6 m y con zona horaria de -8 GMT. Tiene un clima cálido-seco, la temperatura varía de 0.5°C a 48°C en todo el año, siendo los meses más calurosos julio y agosto con una temperatura promedio de 33°C . Mientras que la humedad relativa varía de 2 % a 100 %, el mes con menor humedad relativa es mayo con un promedio de 22 %, por el contrario, febrero tiene la humedad relativa mayor con 56 %.

Hermosillo se encuentra en las coordenadas 29.10, -110.97 , tiene una elevación de 211 m, con zona horaria de -7 GMT y su clima es cálido-seco. Lluvia entre los meses de julio y septiembre, los meses más calurosos son junio, julio y agosto con temperaturas de 32°C , 33°C y 32°C , respectivamente. Los meses más fríos son diciembre con una temperatura promedio de 16°C y enero con 15°C .

Monterrey con latitud de 25.67 y longitud de -100.31 , se encuentra a 515 m del nivel del mar y una zona horaria de -6 GMT. Su clima es semiárido cálido, sus meses con mayor temperatura promedio son julio y agosto con 28°C , mientras que el mes más frío es enero con 14°C . Tiene veranos con mucho calor, inviernos fríos y presenta poca precipitación durante el año.

Tampico con coordenadas 22.28, -97.87 a una altura de 25 m y una zona horaria de -6 GMT. Tiene un clima subtropical húmedo, tiene una temperatura promedio anual de 25°C , el mes con mayor temperatura es junio con 29°C , mientras que el mes de enero registra la menor temperatura con 19°C . Tampico es un lugar muy húmedo con una humedad relativa anual del 78 %.

Guanajuato se ubica en una latitud 21.01 y longitud -101.25 , con una elevación de 1990 m y una zona horaria de -6 GMT. Tiene un clima templado, con una temperatura promedio anual de 18°C , el mes más caluroso es mayo con una temperatura promedio de 22°C , mientras el mes más frío es diciembre con 14°C . La temporada de lluvia se da entre los meses de junio y septiembre.

Querétaro se encuentra en una latitud 20.58 y longitud -100.38 , tiene una elevación de 1880 m y una zona horaria de -6 GMT. Tiene un clima semiárido, una temperatura promedio durante el año de 17°C , el mes más cálido es mayo con una temperatura promedio de 21°C y el mes más frío es enero con una temperatura promedio de 13°C . La humedad relativa durante el año es en promedio 58 %. Su temporada de lluvia se da en entre los meses de mayo y septiembre.

Pachuca con coordenadas 20.11, -98.73 , a una altura de 2435 m y una zona horaria de -6 GMT. Tiene un clima seco-frío, su temperatura promedio anual es de 14°C , siendo mayo el mes más caliente con una temperatura promedio de 17°C , mientras que el mes más frío es enero con una temperatura promedio de 11°C . Su temporada de lluvias se encuentra entre los meses de junio y septiembre.

Cancún se encuentra en una latitud de 21.17 y una longitud de -86.84 , se encuentra a nivel del mar y una zona horaria de -5 GMT. Tiene un clima cálido-húmedo, su temperatura promedio anual es de 23°C y una humedad relativa anual promedio de 79 %. Julio y agosto son los meses más calurosos con una temperatura promedio de 28°C mientras que los meses más fríos son diciembre y enero con una temperatura promedio de 23°C .

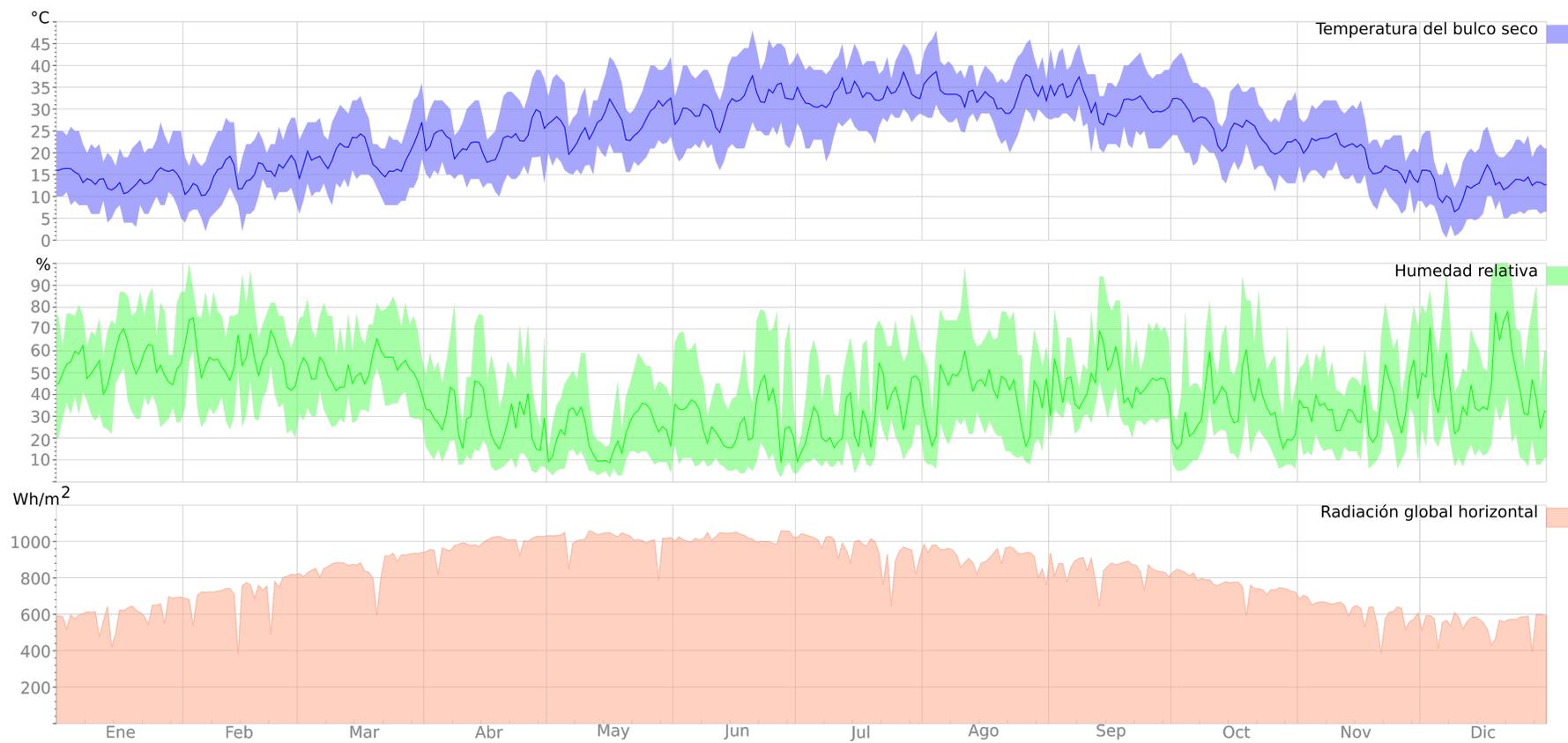


Figura 2.2: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Mexicali.

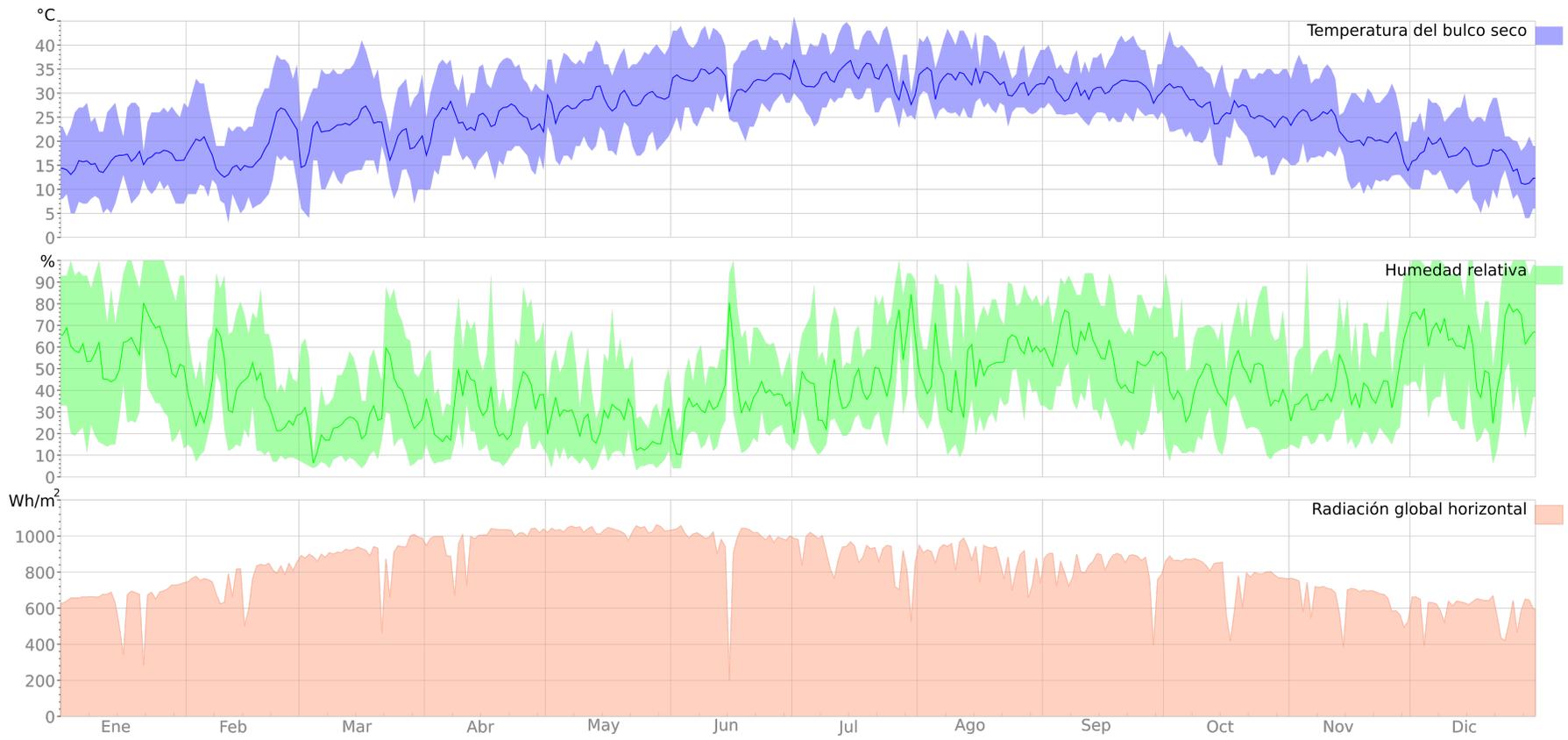


Figura 2.3: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Hermosillo.

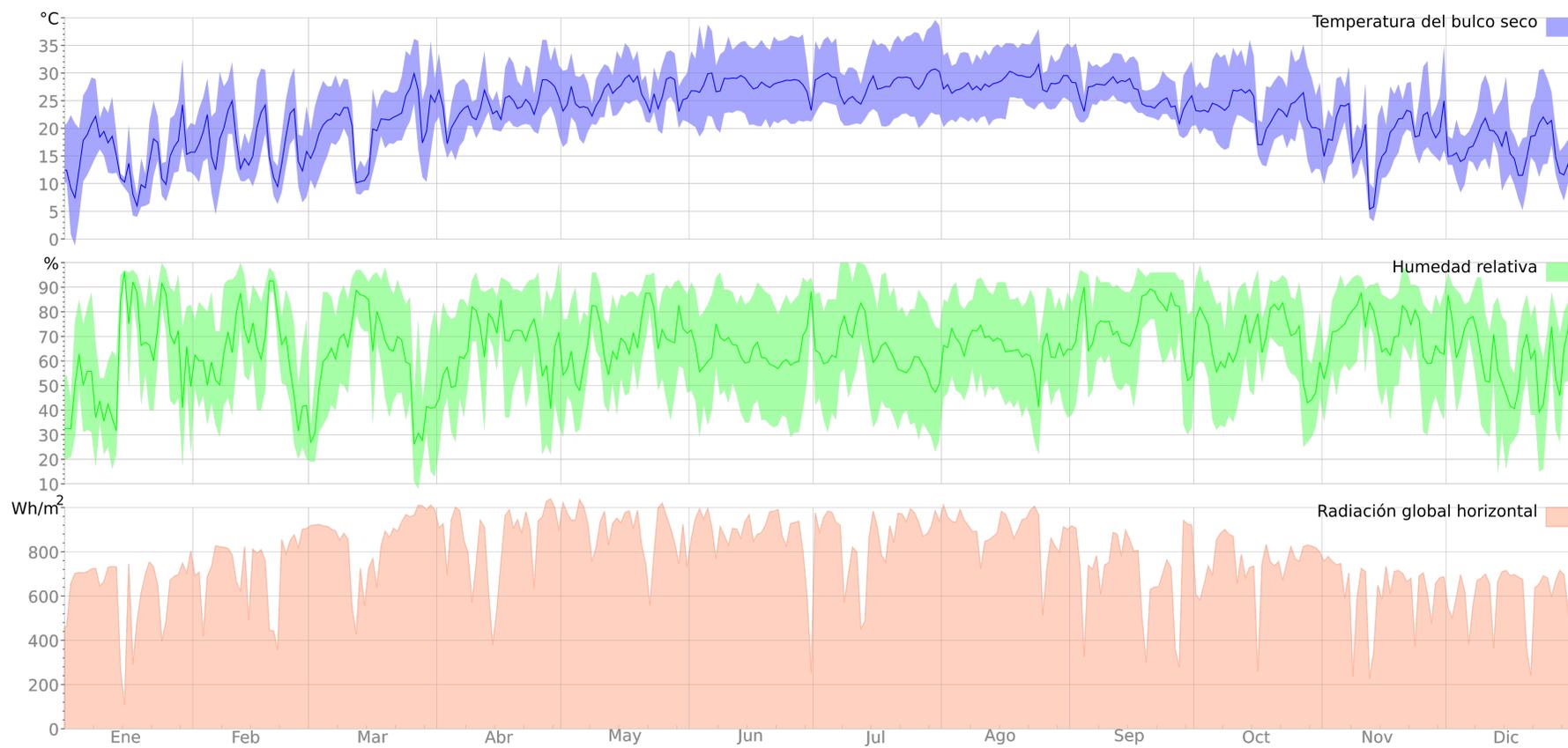


Figura 2.4: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Monterrey.

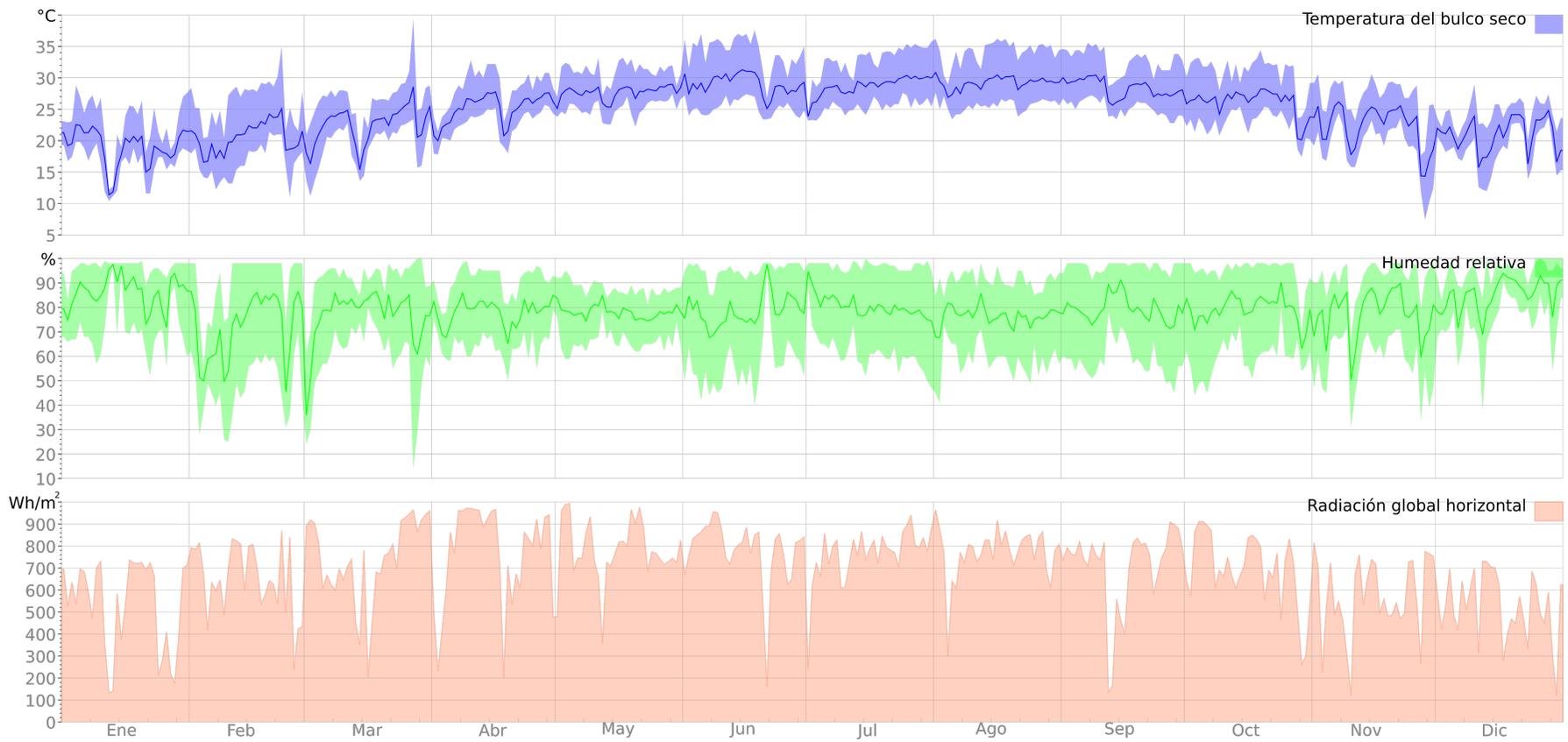


Figura 2.5: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Tampico.

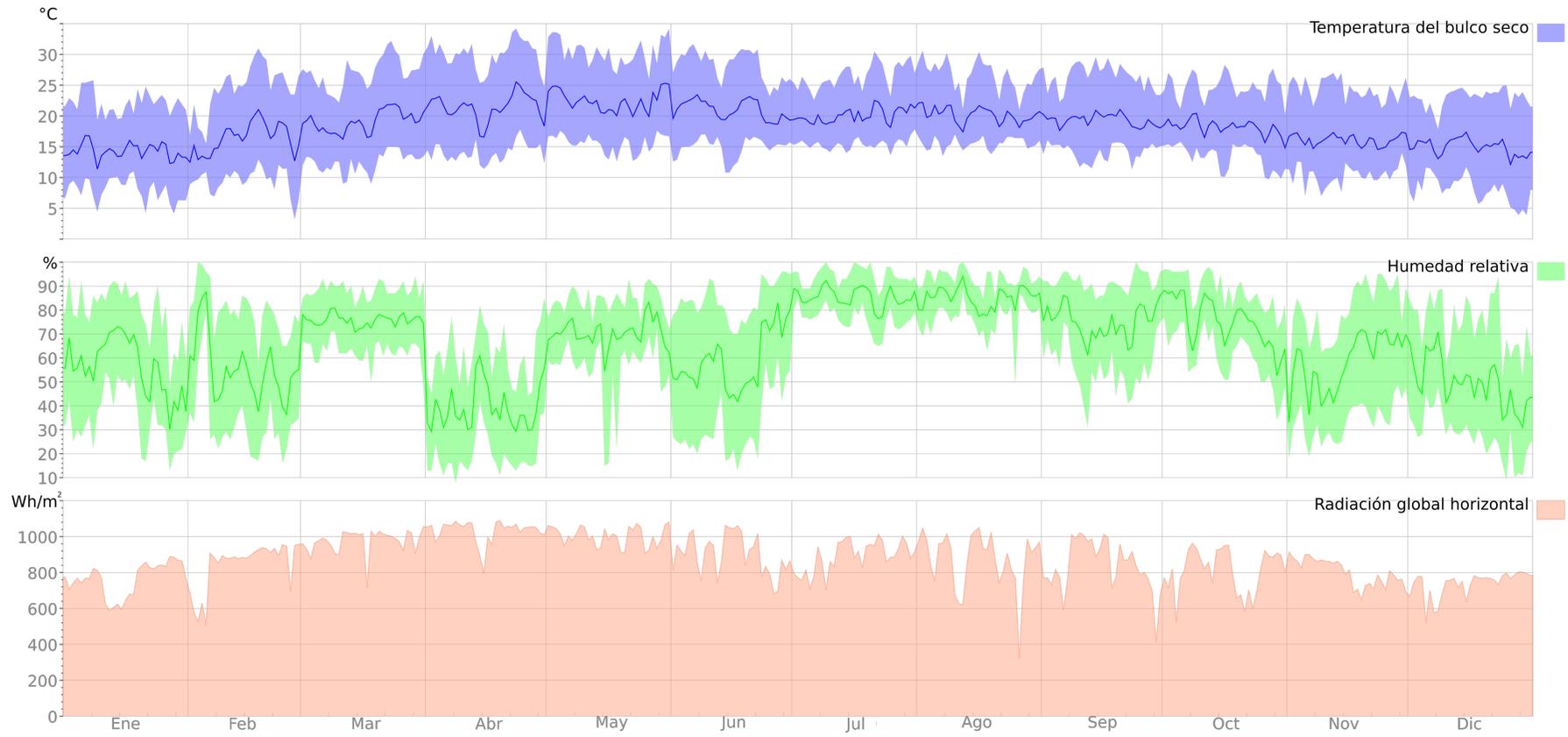


Figura 2.6: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Guanajuato.

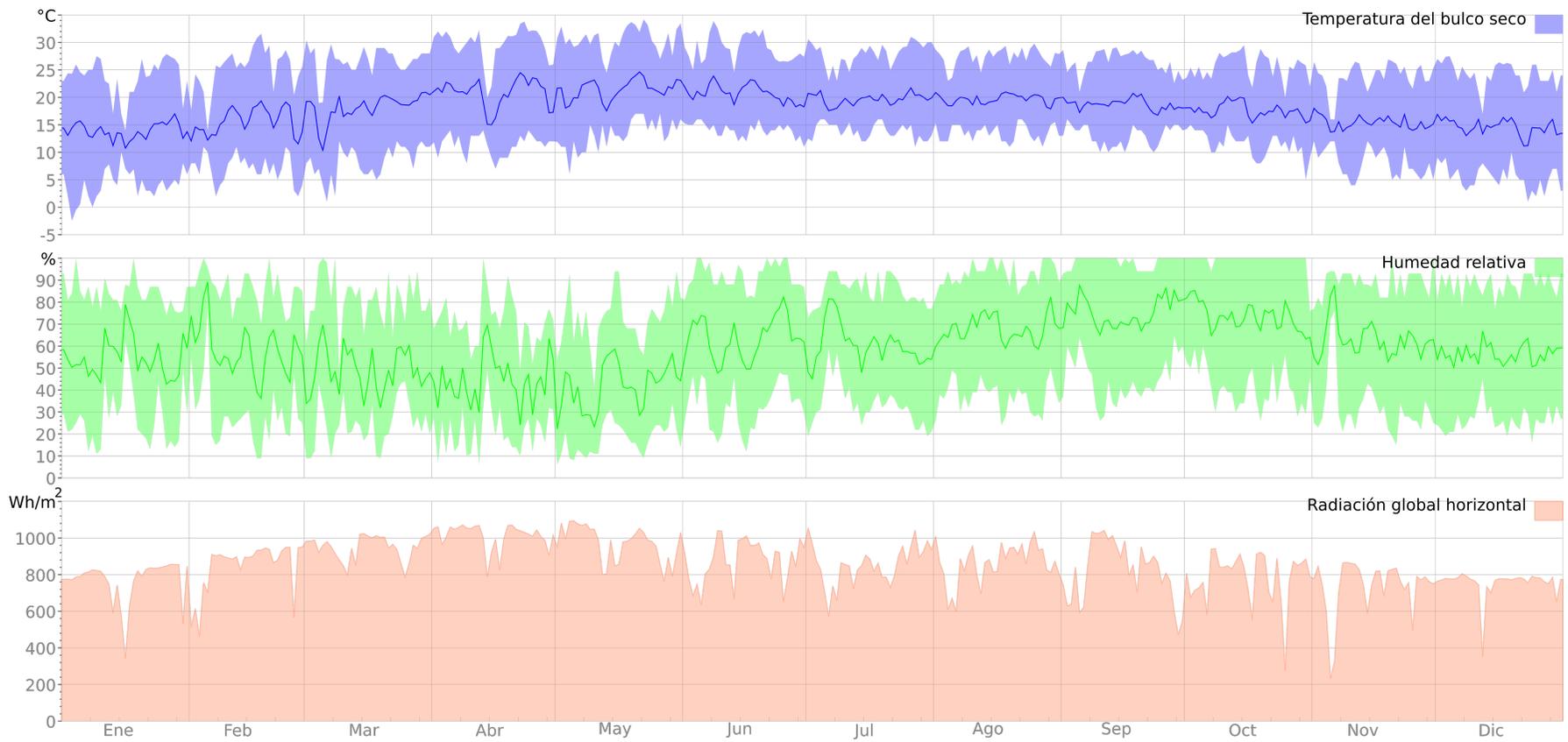


Figura 2.7: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Querétaro.

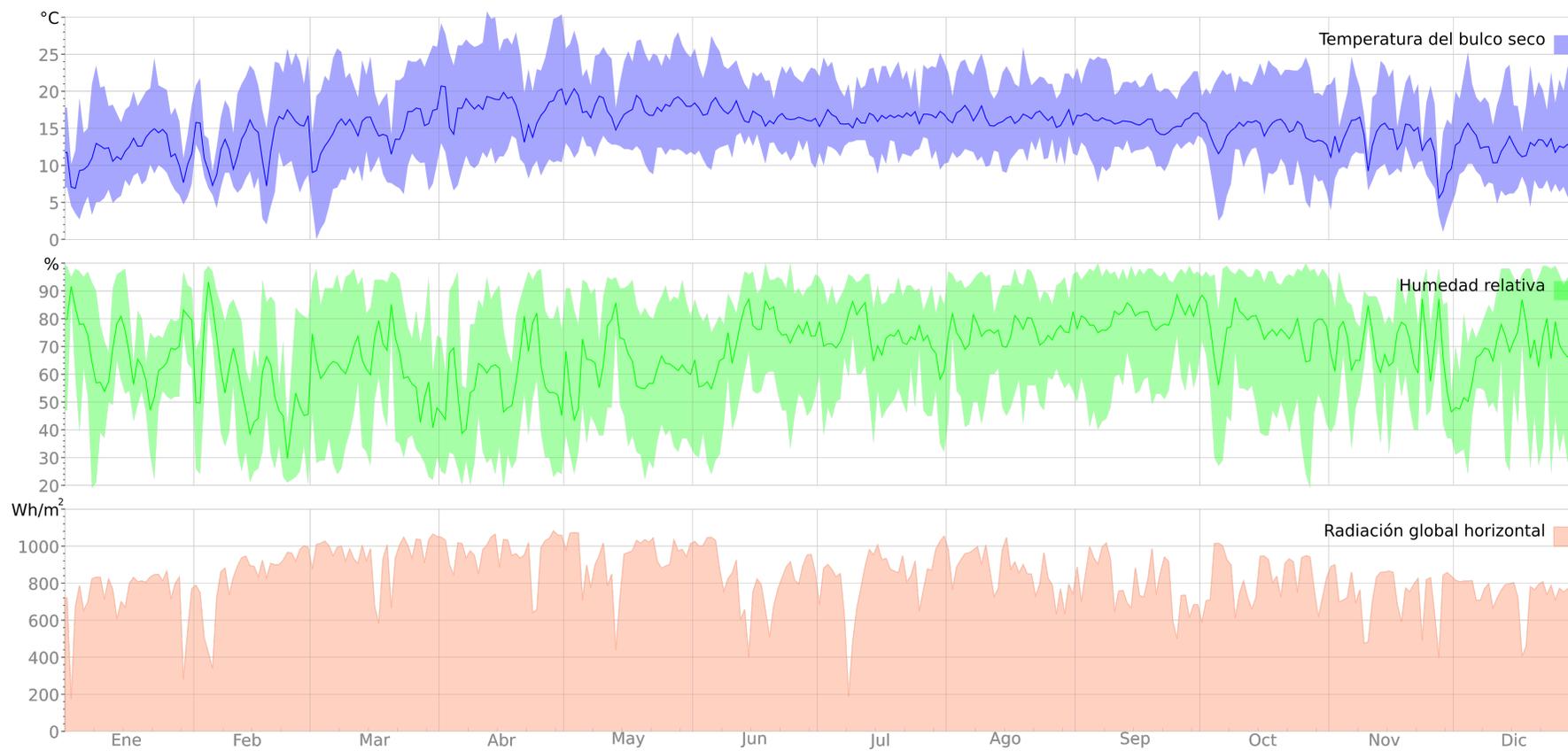


Figura 2.8: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Pachuca.

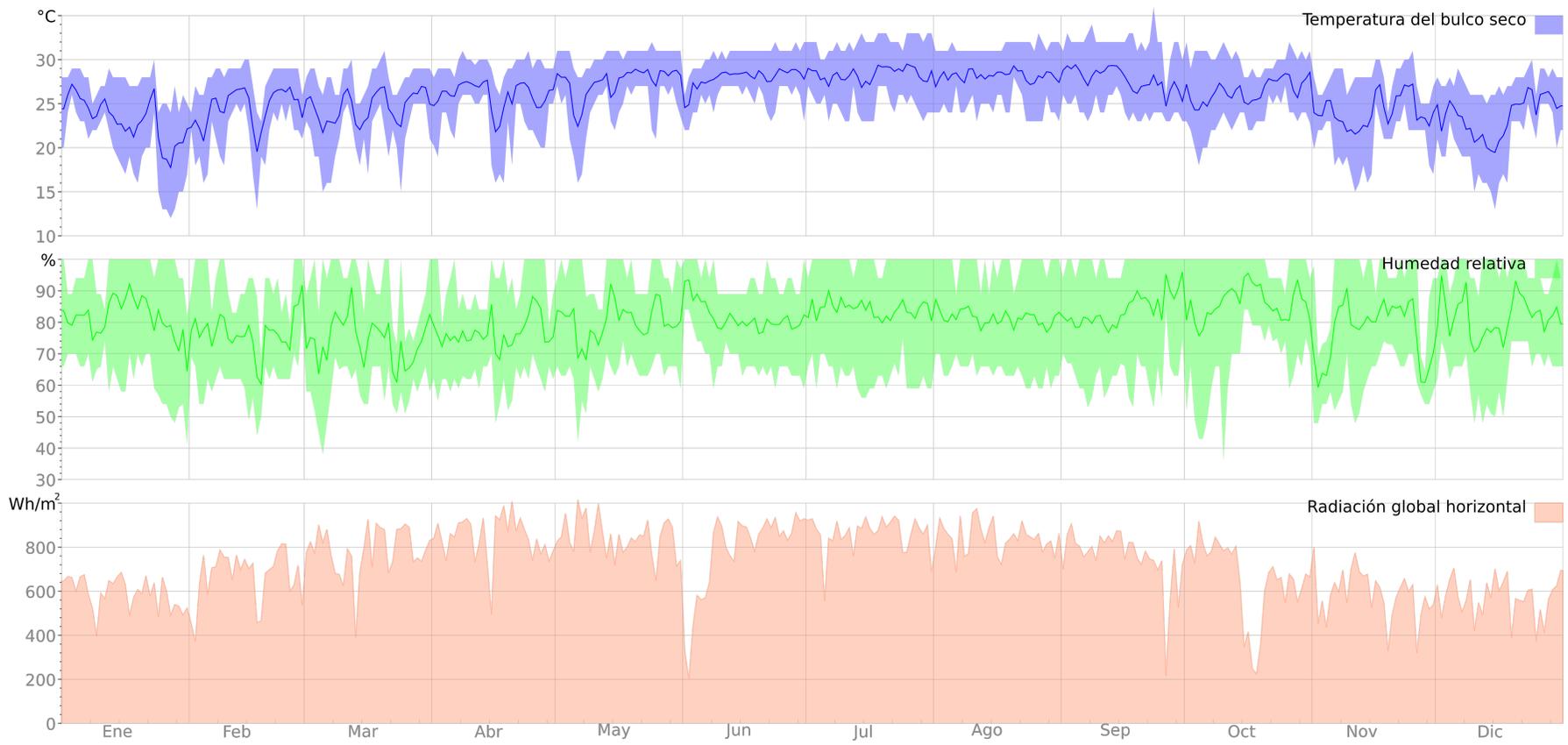


Figura 2.9: Temperatura del bulbo seco, humedad relativa y radiación solar horizontal en la ciudad de Cancún.

Descripción de la vivienda y parámetros de la simulación

El edificio en el que se va a realizar las simulaciones es de un tipo de construcción común presente en las zonas urbanas de México. Son casas usualmente de dos pisos con un número de habitaciones que pueden ser 3 o 4. En este estudio se considerarán que el edificio cuenta con 3 habitaciones. La planta baja tiene una habitación, sala, comedor, cocina y un baño. El primer piso tiene dos habitaciones, una sala de televisión y un baño. La vista de planta del edificio tanto de la planta baja y el primer piso se ilustra en la Figura 2.10.

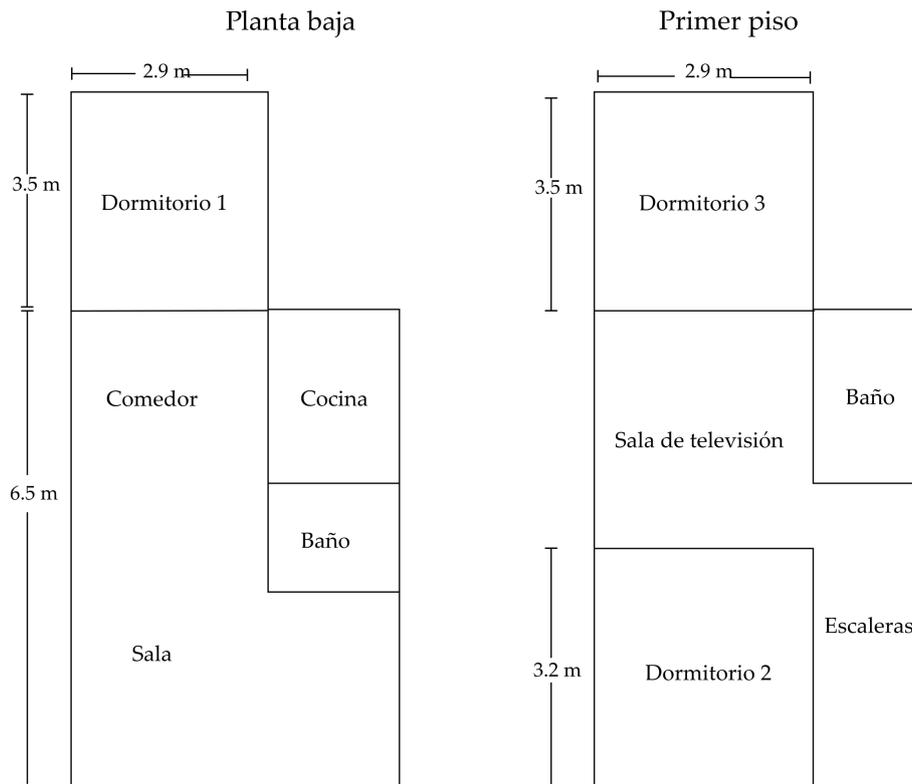


Figura 2.10: Vista superior de la vivienda con dos pisos.

La fachada principal de la vivienda tiene una orientación hacia el sur, su área total es de 78.8 m^2 y su volumen total es de 197.0 m^3 . El dormitorio 1 y 3 tienen un área de 10.15 m^2 con un volumen de 25.38 m^3 y el dormitorio 2 tiene un área de 9.42 m^2 con un volumen de 23.56 m^3 . El dormitorio 3 recibe radiación solar en su fachada este y en el techo, mientras que el dormitorio 1 solamente en su fachada este y el dormitorio 2 tiene ganancia de calor por radiación solar en su fachada sur y en el techo. Los muros exteriores son colindantes con otras casas contiguas, excepto la fachada principal y la fachada posterior. El edificio está expuesto a las condiciones ambientales en las superficies frontal, trasera y techo, mientras que las restantes paredes y suelo serán consideradas a condiciones adiabáticas (Figura 2.11). Se considera una razón de infiltración en la vivienda de 0.6 cambios de aire por hora que se encuentra en el rango utilizado por Simá et al. (2015) y Anwar et al. (2021). En México, la forma habitual que se usa para la construcción de muros en los edificios es el uso de ladrillos con una capa de aplanado en la superficie exterior e interior.

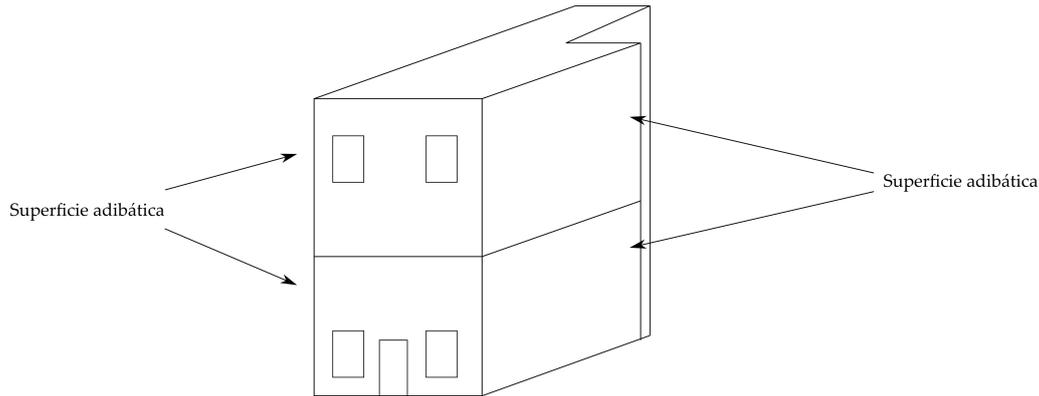


Figura 2.11: Vivienda de dos pisos con superficies adiabáticas.

Debido a esto, se considera la misma práctica para el edificio en este documento. En la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 se presentan las características de la construcción del edificio que se simula. En la Figura 2.12 se muestra la ubicación de los elementos que se encuentran en el edificio.

Tabla 2.2: Materiales de la envolvente, su espesor y propiedades térmicas.

Nombre	Material	Espesor (m)	Conductividad térmica ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Densidad (kg m^{-3})	Calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
Planta baja	Azulejo	0.08	1.59	1920	1260
	Mortero	0.004	0.72	1760	840
	Concreto	0.1	1.95	2240	900
Entre piso	Azulejo	0.08	1.59	1920	1260
	Mortero	0.004	0.72	1760	840
	Concreto	0.1	1.95	2240	900
	Yeso	0.02	0.82	1680	840
Pared	Aplanado	0.02	0.82	1680	840
	Ladrillo	0.11	0.85	1500	840
	Aplanado	0.02	0.82	1680	840
Techo Convencional	Terracota	0.0254	0.58	1500	1480
	Concreto	0.1	1.95	2240	900
	Yeso	0.02	0.82	1680	840
Techo verde	Cubierta vegetal	-	-	-	-
	Terracota	0.0254	0.58	1500	1480
	Concreto	0.1	1.95	2240	900
	Yeso	0.02	0.82	1680	840

Tabla 2.3: Características de las ventanas y puerta.

Nombre	Espesor (mm)	Conductividad ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	Area (m^2)
Ventana	3	0.9	0.72
Puerta	25	0.15	1.8

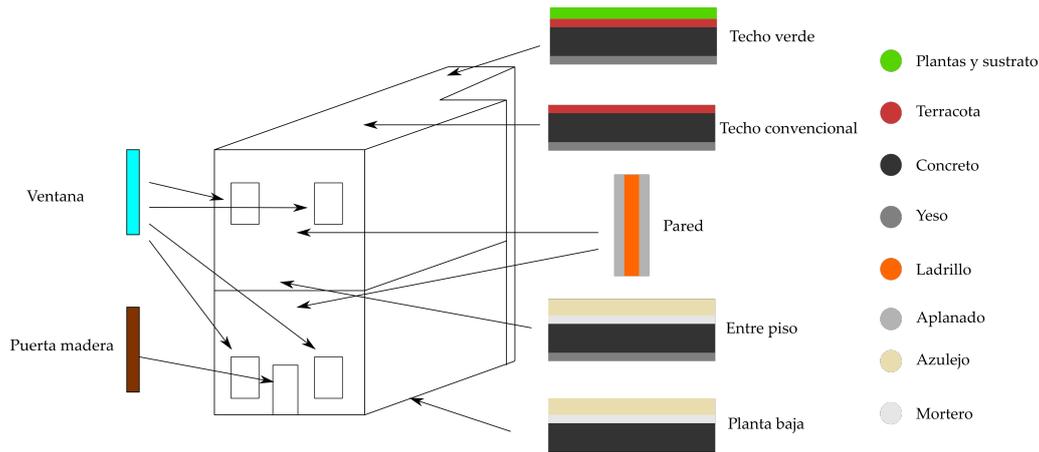


Figura 2.12: Vivienda de dos pisos con su envolvente.

Para la realización de las simulaciones de la implementación de un techo verde se considerará un espesor del sustrato de 0.10 m y un LAI de 5. Las características completas de la capa vegetal y sustrato se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4: Parámetros del techo verde.

	Parámetro	Valor	Unidades
Planta	Altura plantas	0.2	m
	LAI	5	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
	Reflectividad de la hoja	0.22	Adimensional
	Emisividad de la hoja	0.95	Adimensional
	Resistencia estomatal mínima	180	s m^{-1}
Sustrato	Espesor	0.1	m
	Conductividad	0.35	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
	Densidad	1100	kg m^{-3}
	Calor específico	1200	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$

Para el cálculo de la sensación térmica se utiliza el modelo de voto medio estimado, se considera una velocidad del viento en los dormitorios de 0.15 m s^{-1} y una persona con un clo de 0.5 que toma en cuenta una vestimenta de: calzoncillos, camisa de manga corta, pantalones ligeros, calcetines ligeros y zapatos. La actividad es de una persona sentada con un trabajo muy ligero (120 W).

Finalmente, para el uso de aire acondicionado se utiliza el sistema de climatización ideal de EnergyPlus, este modo de modelar se usa para el dimensionamiento de aire acondicionado. Este no está conectado a un sistema de aire central y suministra el aire suficiente para la climatización de un espacio. Se considera una temperatura de set point de 23°C para la simulación del sistema para climatizar los dormitorios.

Para calcular la disminución de emisiones de CO_2e (bióxido de carbono equivalente) debido a la utilización del techo verde en la vivienda con uso del sistema de climatización se utiliza el factor de emisión del sistema de eléctrico nacional, este factor es de $0.435 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$ (SEMARNAT, 2023).

3

Resultados

3.1 Mexicali

Se simula el comportamiento térmico de toda la vivienda durante un año utilizando el software EnergyPlus con las condiciones ambientales climáticas de Mexicali con un techo convencional, no obstante, solamente se presentan la temperatura del aire en el dormitorio 1 (D1), dormitorio 2 (D2) y del dormitorio 3 (D3) en el día 15 de cada mes (Figura 3.1).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo convencional en Mexicali es de 13.1°C , 13.4°C y 10.9°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 43.3°C , 45.7°C y 47.3°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 28.2°C , 29.5°C y 28.5°C , respectivamente (Figura 3.1).

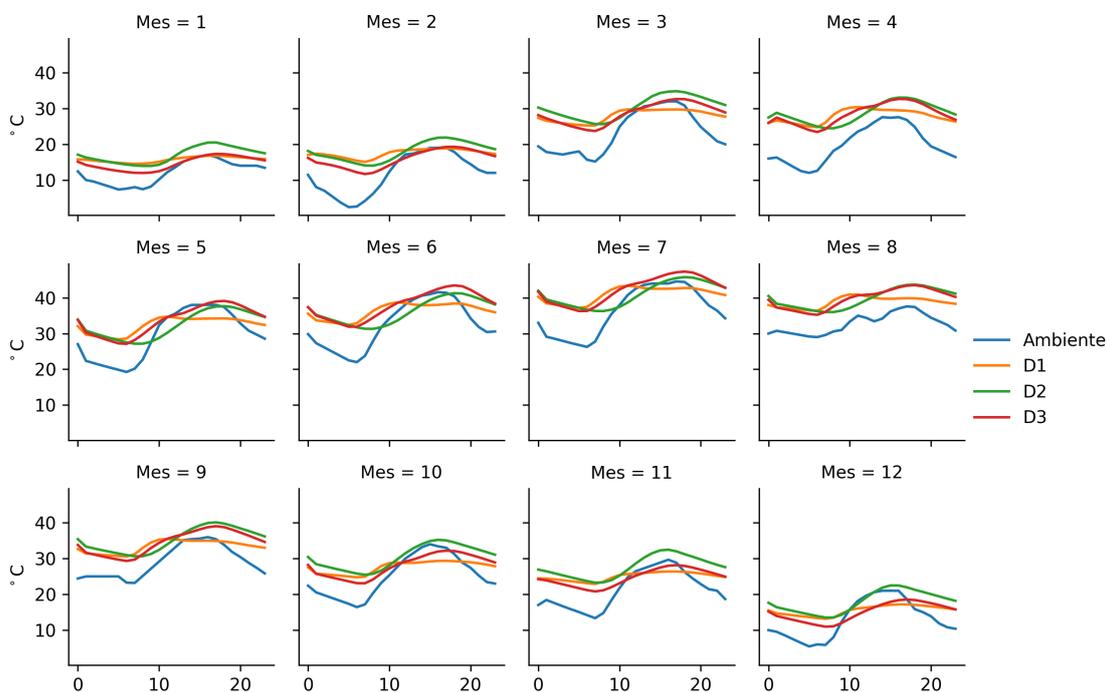


Figura 3.1: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Mexicali.

Para valorar la sensación térmica de confort que se tiene en los tres dormitorios de la vivienda se utiliza el método PMV para el día 15 de cada mes. En el D1 existe

una sensación de frío en los meses de enero, febrero y diciembre durante todo el día. La sensación de calor se experimenta principalmente durante el verano a partir de las 10 horas. Esta sensación de calor extremo se siente durante todo el día en los meses de julio y agosto. Durante las primeras horas del día de marzo, abril, octubre y noviembre existe una sensación de confort térmico (Figura 3.2).

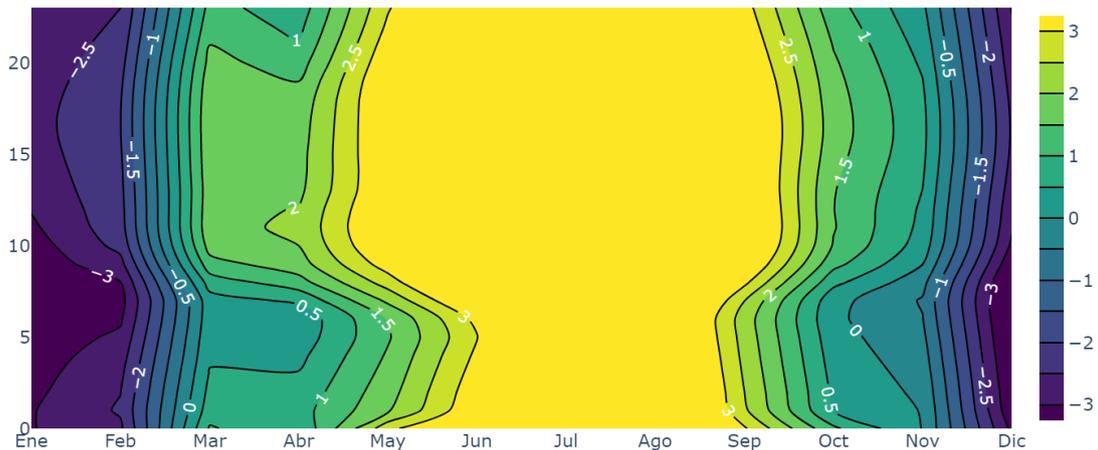


Figura 3.2: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Mexicali.

En el D2 la sensación de frío se experimenta con más intensidad en las primeras horas del día durante los meses de enero, febrero y diciembre. Mientras que la sensación de calor se experimenta en los demás meses del año, esta sensación se incrementa a partir de las 10 horas especialmente durante el verano. Entre los meses de junio y septiembre la sensación de calor es extrema durante todo el día. La sensación de confort térmico en el D2 se da entre las 7–8 horas en marzo, 5–10 horas en abril, 6–8 horas en octubre y 2–10 horas en noviembre (Figura 3.3).

En el D3 la sensación de frío está presente en los meses de enero, febrero y diciembre principalmente; siendo las primeras horas del día en donde se encruce esta sensación. La sensación de calor se experimenta principalmente en verano y se intensifica después de las 10 horas, durante los meses de verano se tiene una sensación de calor en todo el día. Se siente una sensación de confort térmico en el D3 entre las 3–8 horas en marzo, 3–7 horas en abril, 2–9 en octubre y entre las 22–2 horas de noviembre (Figura 3.4).

Se realiza una nueva simulación con EnergyPlus de la vivienda durante un año implementando un techo verde, reportando la temperatura de los tres dormitorios (D1, D2 y D3) en el día 15 de cada mes (Figura 3.5).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo verde son 12.9 °C, 14.9 °C y 14.9 °C, respectivamente; sus temperaturas máximas son 40.9 °C, 36.1 °C y 39.1 °C, respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 27.1 °C, 26.3 °C y 25.9 °C, respectivamente (Figura 3.5).

El techo verde reduce la temperatura interior en los D1, D2 y D3 en Mexicali un

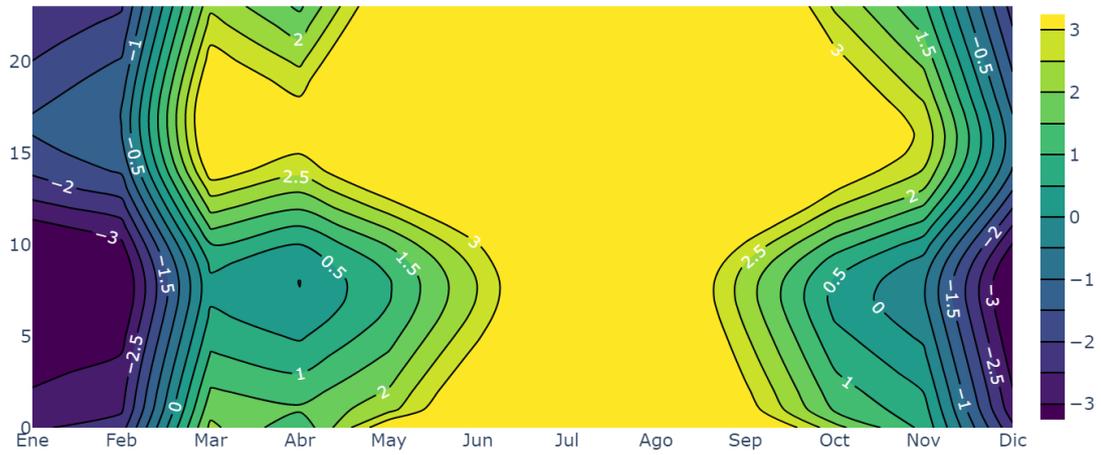


Figura 3.3: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Mexicali.

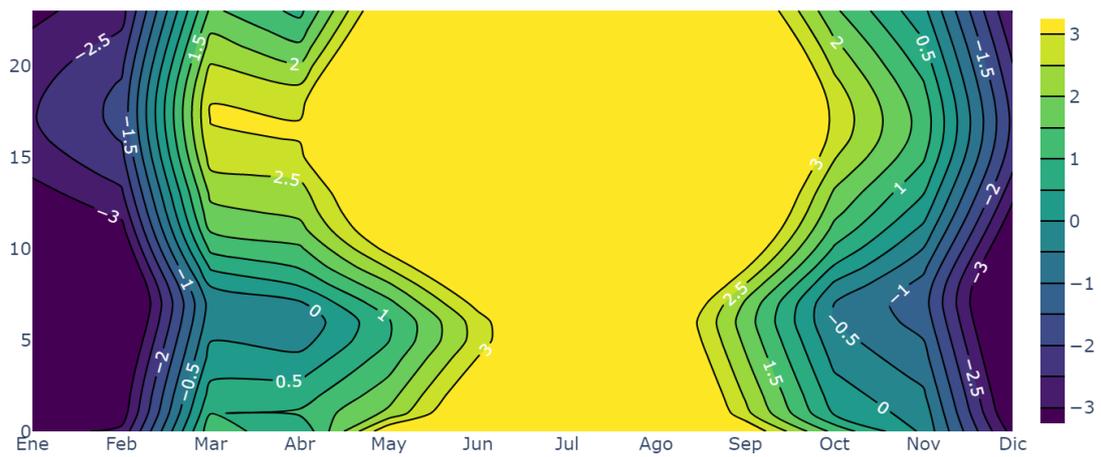


Figura 3.4: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Mexicali.

máximo de 2.6°C , 10.7°C y 9.0°C , respectivamente; la utilización del techo verde reduce en promedio 1.1°C , 3.1°C y 2.5°C en los D1, D2 y D3.

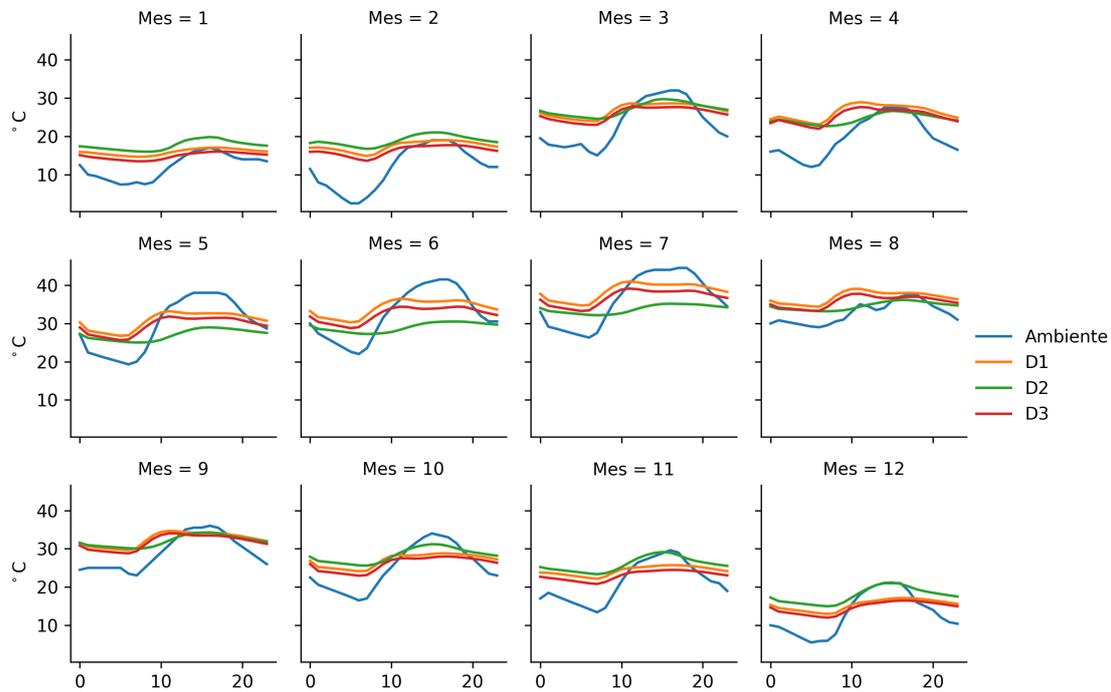


Figura 3.5: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Mexicali.

El techo verde logra reducir la sensación de calor en el D1 durante los meses de marzo, abril, octubre y noviembre. En el mes de noviembre la sensación térmica más frecuente es de confort. Durante el verano el techo verde logra reducir la sensación de calor durante las primeras horas del día, durante la tarde la sensación térmica es de caliente (Figura 3.6). En el D2 el techo verde logra reducir la sensación de calor durante los meses de marzo, abril, mayo, junio octubre y noviembre. Esto también ocurre en las primeras horas de septiembre hasta las 12 horas. Durante diciembre, enero y febrero sigue existiendo una sensación de frío en el D2 (Figura 3.7).

En el D3 el techo verde, de igual manera, logra reducir la sensación de calor durante los meses de marzo, abril, mayo, junio, octubre y noviembre. Mientras que la sensación de frío se presenta todo el día en enero, febrero, y diciembre (Figura 3.8). Debido a que el techo verde es insuficiente para lograr un confort térmico en los dormitorios, se simula el uso de aire acondicionado con un techo convencional y otro caso con el techo verde para analizar el ahorro en el consumo de energía de un sistema de aire acondicionado. El techo verde logra reducir el consumo de energía debido al uso de aire acondicionado en los tres dormitorios, la reducción anual en enfriamiento para el D1, D2 y D3 es de 11.2% , 46% y 39.6% , respectivamente. Mientras que, para la reducción en el consumo de energía para la calefacción para el D1, D2 y D3 es de -2.2% , 27.3% y 10.6% (Tabla 3.1). Con esta reducción del consumo de energía por enfriamiento se evitan emitir 145.7 kg , 908.5 kg y 728.9 kg de CO_2e anuales en los dormitorios D1, D2 y D3, respectivamente (Tabla 3.1).

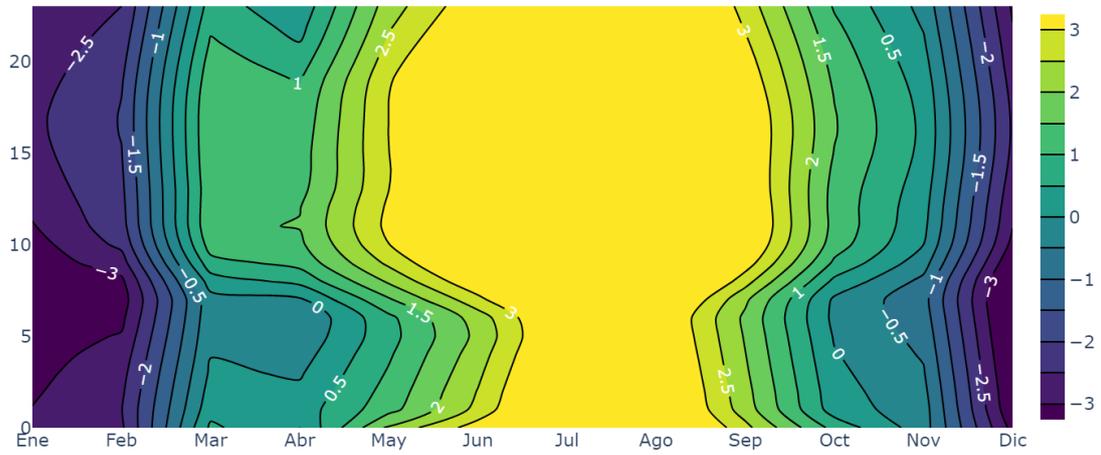


Figura 3.6: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Mexicali.

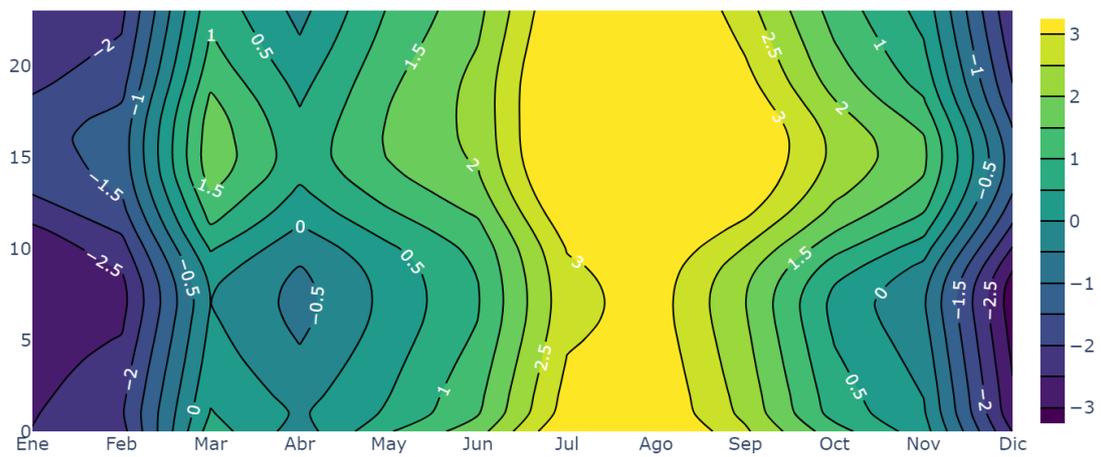


Figura 3.7: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Mexicali.

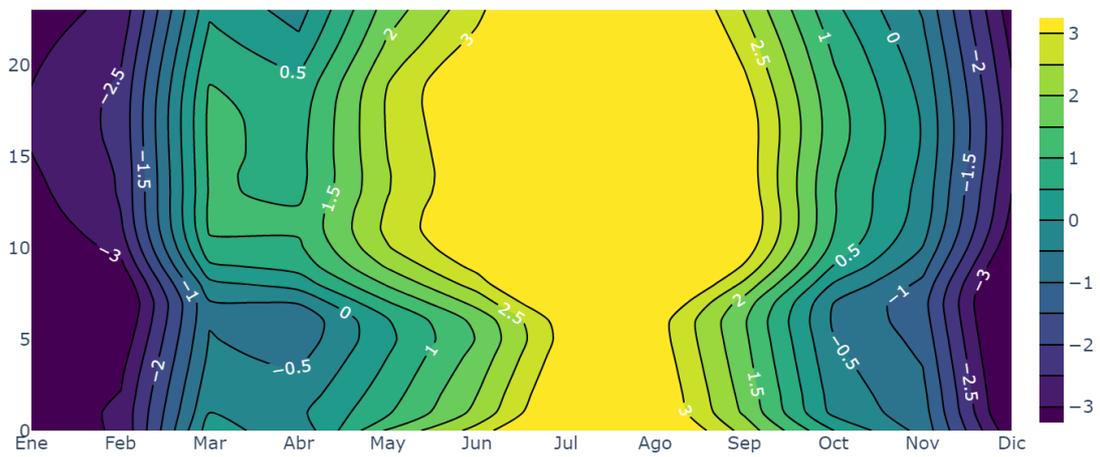


Figura 3.8: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Mexicali.

Tabla 3.1: Consumo de energía por climatización en Mexicali.

Mes	Calefacción D1 (kWh)		Enfriamiento D1 (kWh)		Calefacción D2 (kWh)		Enfriamiento D2 (kWh)		Calefacción D3 (kWh)		Enfriamiento D3 (kWh)	
	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde
Ene	150.6	148.3	1.1	1.7	146.6	95.4	63.2	47.1	250.3	215.7	9.1	0.0
Feb	111.4	114.2	13.5	11.9	116.3	83.8	70.1	36.4	189.2	168.3	28.7	3.6
Mar	31.9	38.9	98.9	84.6	40.6	35.0	191.8	91.1	69.9	66.6	144.1	63.0
Abr	5.5	9.8	196.4	165.3	10.3	16.0	284.5	101.8	19.5	24.0	279.7	132.8
May	0.4	1.1	344.8	297.6	1.3	1.7	445.3	169.7	3.3	3.7	488.6	265.8
Jun	0.0	0.0	491.6	434.0	0.0	0.0	644.2	298.7	0.0	0.0	703.8	422.9
Jul	0.0	0.0	564.3	504.3	0.0	0.0	757.3	395.1	0.0	0.0	803.0	509.6
Ago	0.0	0.0	543.7	491.7	0.0	0.0	774.1	448.3	0.0	0.0	775.6	511.9
Sep	0.0	0.0	429.0	392.4	0.0	0.0	663.0	437.4	0.0	0.0	597.3	412.6
Oct	3.3	4.9	237.0	210.9	3.3	1.2	439.0	286.6	14.6	12.4	316.3	193.4
Nov	50.0	53.4	64.2	55.2	50.1	36.2	166.7	110.9	103.0	96.0	81.2	38.5
Dic	209.5	204.5	0.2	0.3	212.2	152.9	36.1	23.5	335.7	293.9	2.3	0.0
Anual	562.6	575.2	2984.8	2649.8	580.8	422.3	4535.3	2446.8	985.5	880.6	4229.8	2554.1
Reducción anual (%)	-2.2		11.2		27.3		46.0		10.6		39.6	
Reducción anual de CO ₂ e (kg)	-5.5		145.7		69.0		908.5		45.6		728.9	

3.2 Hermosillo

Para la ciudad de Hermosillo se emplea un procedimiento similar al caso de Mexicali, con la diferencia que se usan las condiciones climáticas de Hermosillo. Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo convencional en Hermosillo es de 17.2°C , 17.3°C y 14.8°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 44.4°C , 46.1°C y 47.6°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 30.3°C , 31.5°C y 30.4°C , respectivamente (Figura 3.9).

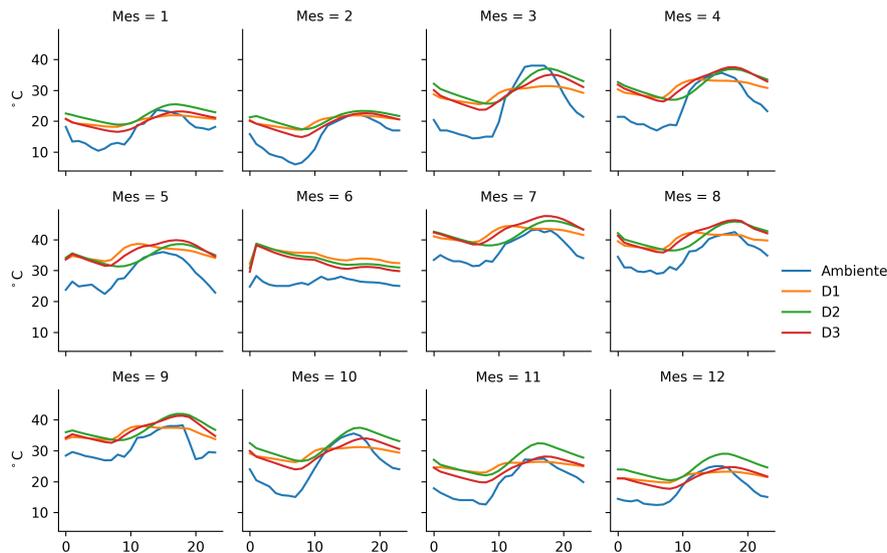


Figura 3.9: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Hermosillo.

En el D1 con techo convencional en Hermosillo se presenta una sensación de frío en los meses de diciembre, enero y febrero durante la mayor parte del día. Mientras que la sensación de calor se experimenta entre los meses de marzo y octubre, siendo mayo, junio, julio, agosto y septiembre los meses con una sensación de calor mayor, esta sensación se presenta durante todo el día (Figura 3.10).

En el D2 con techo convencional en Hermosillo la sensación de frío se experimenta durante los meses enero y febrero, en el mes de diciembre solamente se tiene esta sensación durante las primeras horas del día. La sensación de calor está presente entre los meses de marzo y noviembre, esta sensación se tiene durante todo el día durante los meses mayo, junio, julio, agosto y septiembre (Figura 3.11).

En el D3 con techo convencional en Hermosillo la sensación de frío está presente durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, esta sensación se intensifica durante las primeras horas del día. La sensación de calor se experimenta principalmente entre los meses marzo y octubre, durante estos meses la sensación de calor se tiene durante todo el día (Figura 3.12).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo verde en Hermosillo son 16.3°C , 17.9°C y 15.2°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 41.9°C , 36.8°C y 40.6°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 29.0°C , 28.4°C y 28.1°C , respectivamente (Figura 3.13).

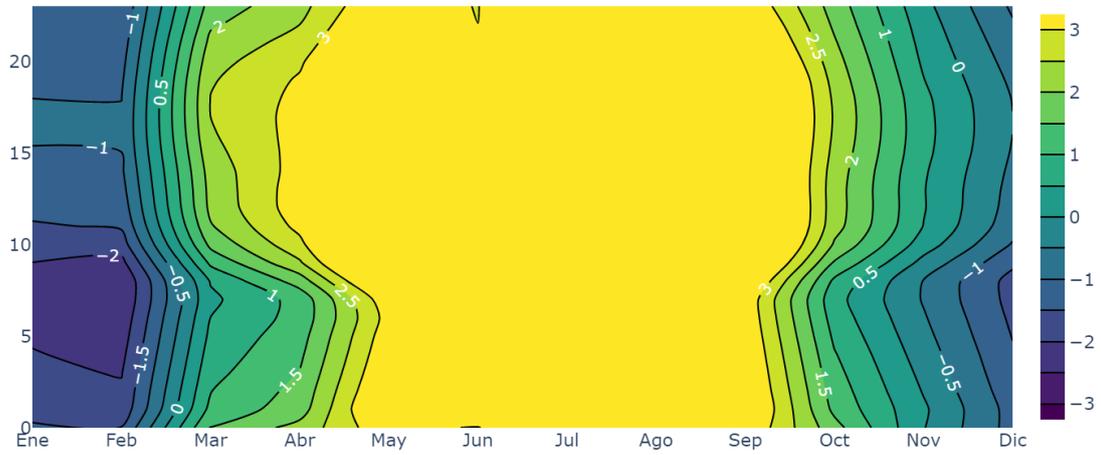


Figura 3.10: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Hermosillo.

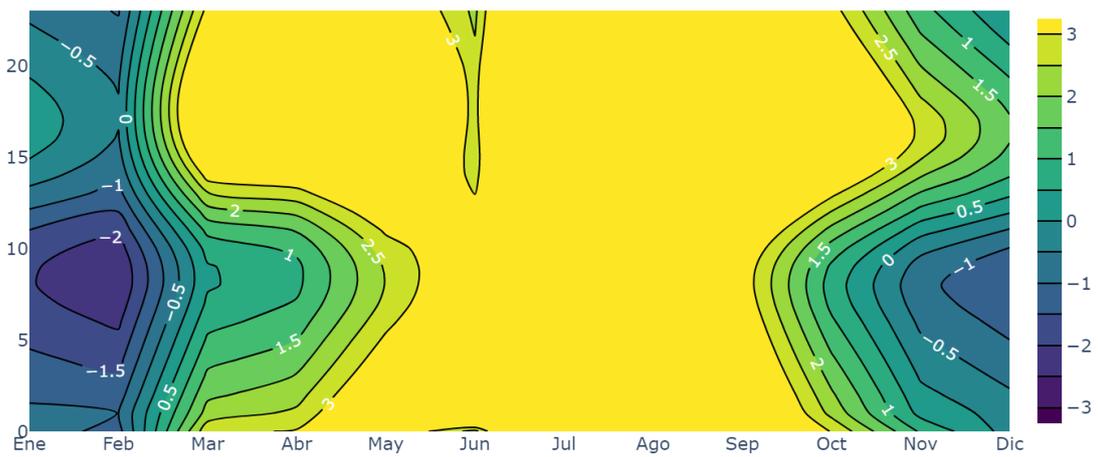


Figura 3.11: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Hermosillo.

3. Resultados

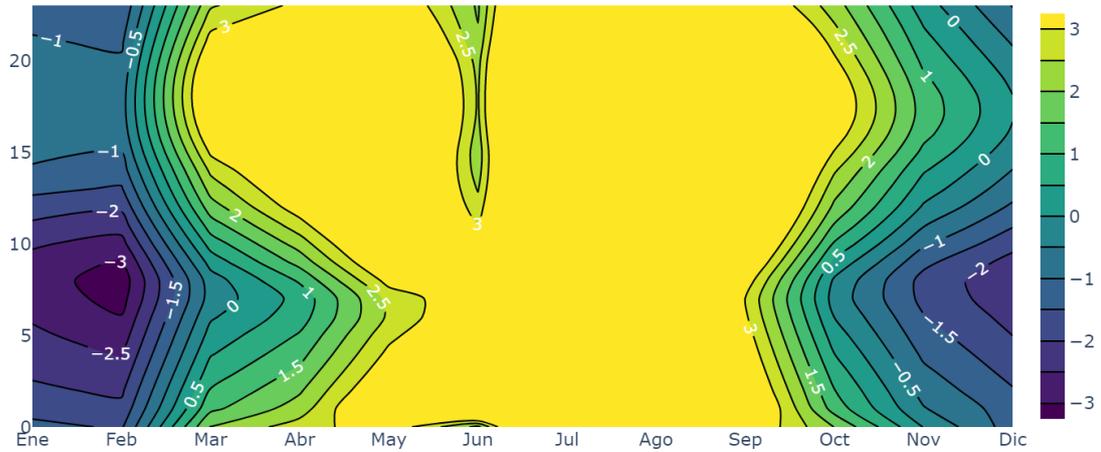


Figura 3.12: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Hermosillo.

El techo verde reduce la temperatura interior en los D1, D2 y D3 en Hermosillo un máximo de 2.8°C, 9.4°C y 7.9°C; la utilización del techo verde reduce en promedio 1.2°C, 3.0°C y 2.3°C en los D1, D2 y D3.

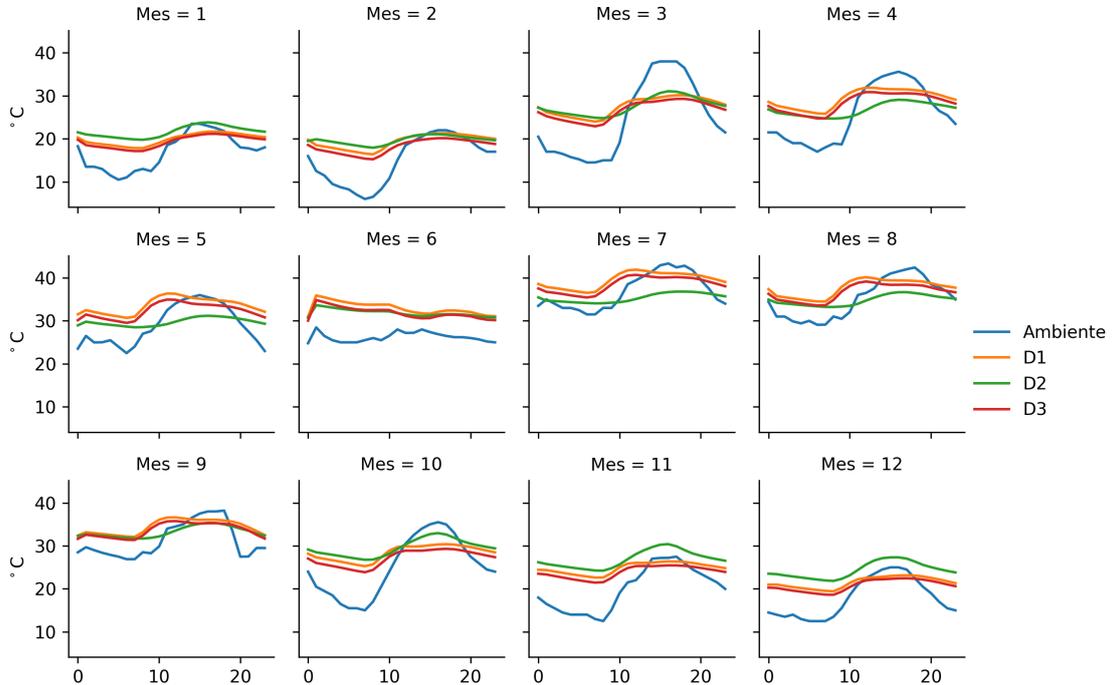


Figura 3.13: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Hermosillo.

El techo verde logra reducir la sensación de calor en el D1 en Hermosillo durante los

meses de marzo y abril. Entre los meses de mayo y septiembre sigue existiendo una sensación de calor extrema durante todo el día (Figura 3.14).

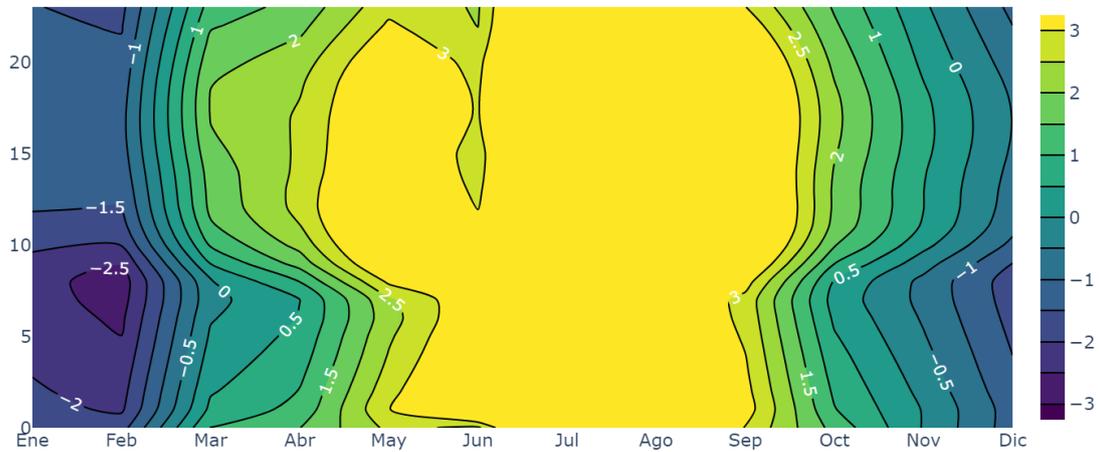


Figura 3.14: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Hermosillo.

En el D2 en Hermosillo el techo verde logra reducir la sensación de calor durante los meses de marzo, abril, mayo, junio y octubre. Existe confort térmico durante las primeras horas del día en el mes de marzo y durante la mayor parte del día del mes de noviembre (Figura 3.16). En el D3 en Hermosillo el techo verde logra reducir la

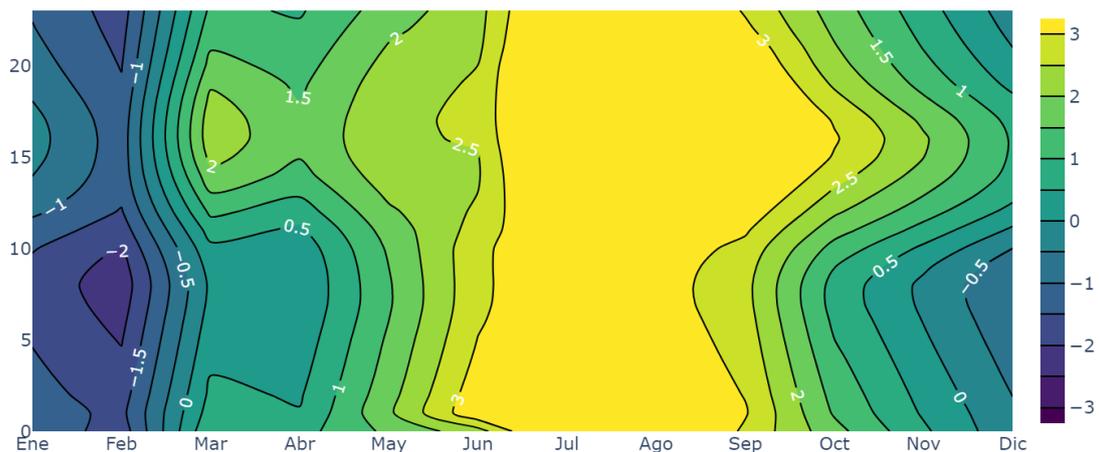


Figura 3.15: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Hermosillo.

sensación de calor durante los meses marzo, abril y octubre. El techo verde permite

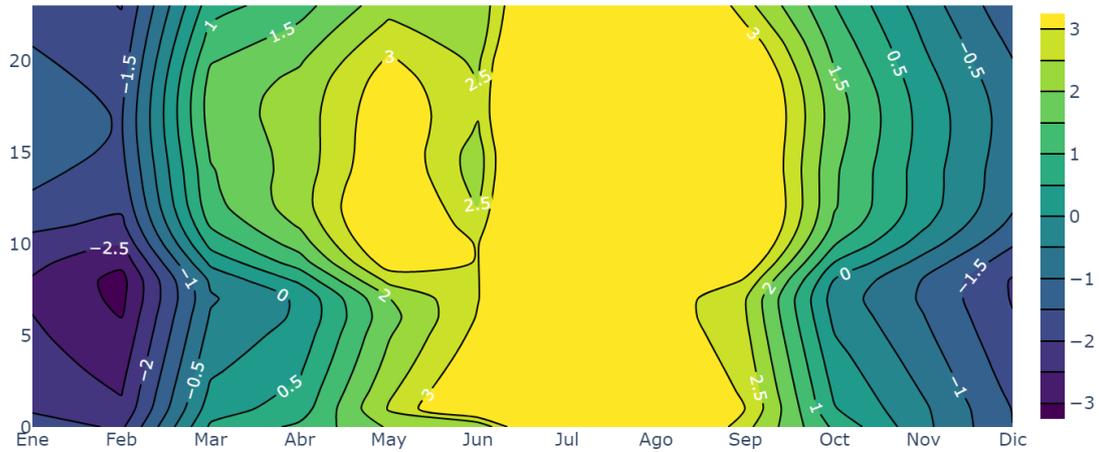


Figura 3.16: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Hermosillo.

llegar a una sensación de confort durante las primeras horas del día en los meses de marzo, abril y octubre (Figura 3.16).

El techo verde es insuficiente para lograr un confort térmico en los dormitorios principalmente durante los meses de mayo, abril, junio, julio y agosto. Sin embargo, el techo permite reducir el consumo de energía debido al uso de un aire acondicionado en los tres dormitorios. La reducción anual en enfriamiento para D1, D2 y D3 es de 10.7%, 44.0% y 38.3%, respectivamente. Mientras que, para la reducción en el consumo de energía por calefacción para el D1, D2 y D3 es de -9.1%, 32.8% y 12.1%, respectivamente (Tabla 3.2). Con esta reducción del consumo de energía por enfriamiento se evitan emitir 153.1 kg, 945.0 kg y 768.0 kg de CO₂e anuales en los dormitorios D1, D2 y D3, respectivamente (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Consumo de energía por climatización en Hermosillo.

Mes	Calefacción D1 (kWh)		Enfriamiento D1 (kWh)		Calefacción D2 (kWh)		Enfriamiento D2 (kWh)		Calefacción D3 (kWh)		Enfriamiento D3 (kWh)	
	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde
Ene	91.7	96.1	15.7	14.5	87.1	55.6	106.2	69.6	168.5	148.0	35.6	4.2
Feb	49.9	56.9	70.8	61.3	54.8	46.8	166.1	90.8	100.3	96.6	104.1	44.3
Mar	13.5	20.2	166.1	140.8	16.4	16.3	284.1	126.7	40.2	41.9	234.3	110.2
Abr	2.1	4.5	253.9	215.3	3.2	5.8	346.9	135.2	8.8	11.5	356.7	186.3
May	0.0	0.0	388.1	339.6	0.0	0.0	474.7	191.1	0.1	0.1	542.6	311.9
Jun	0.0	0.0	512.3	460.7	0.0	0.0	652.3	338.1	0.0	0.0	723.4	468.6
Jul	0.0	0.0	542.7	491.0	0.0	0.0	732.0	418.1	0.0	0.0	772.0	517.6
Ago	0.0	0.0	508.4	460.9	0.0	0.0	713.7	415.0	0.0	0.0	729.3	486.2
Sep	0.0	0.0	403.3	367.0	0.0	0.0	616.7	395.6	0.0	0.0	565.4	385.6
Oct	0.0	0.4	279.1	250.4	0.0	0.0	484.2	319.3	3.1	2.0	373.6	240.0
Nov	14.1	16.8	117.5	105.2	14.6	4.5	260.2	189.4	46.9	34.1	145.3	84.7
Dic	95.8	96.5	17.4	16.7	94.7	53.1	95.9	71.8	178.5	145.9	30.3	7.7
Anual	267.2	291.4	3275.2	2923.3	270.9	182.1	4932.9	2760.6	546.4	480.2	4612.5	2847.1
Reducción anual (%)	-9.1		10.7		32.8		44.0		12.1		38.3	
Reducción anual de CO ₂ e (kg)	-10.5		153.1		38.6		945.0		28.8		768.0	

3.3 Monterrey

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo convencional en Mexicali son 15.0°C , 14.7°C y 13.2°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 37.4°C , 37.9°C y 39.2°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 26.8°C , 27.3°C y 26.8°C , respectivamente (Figura 3.17). En el D1 con

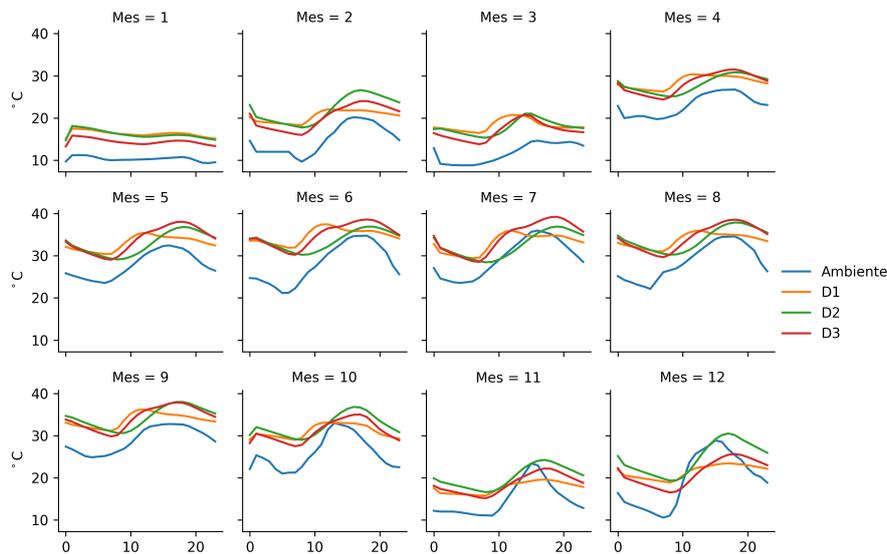


Figura 3.17: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Monterrey.

techo convencional en Monterrey existe una sensación de frío en los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo; los meses con una mayor sensación de frío son enero y noviembre. Entre los meses de abril y octubre existe una sensación de calor durante todo el día, esta sensación se intensifica a partir de las 9 horas (Figura 3.18). En el D2 con techo convencional en Monterrey la sensación de frío se experimenta durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre; en el mes de febrero existe confort térmico durante la tarde. La sensación de calor se presenta entre los meses de abril y octubre, esta sensación se incrementa a partir de las 12 horas (Figura 3.19). En el D3 con techo convencional en Monterrey la sensación de frío está presente en los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre; siendo enero el mes donde se tiene una mayor sensación de frío. La sensación de calor se experimenta entre los meses de abril y octubre, siendo junio, julio, agosto y septiembre los meses donde la sensación de calor se intensifica, especialmente a partir de las 11 horas (Figura 3.20).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo verde son 15.2°C , 16.7°C y 14.5°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 36.0°C , 36.1°C y 39.1°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 27.1°C , 33.0°C y 34.4°C , respectivamente (Figura 3.21).

El techo verde reduce la temperatura interior en los D1, D2 y D3 en Monterrey un máximo de 1.6°C , 7.1°C y 6.1°C , respectivamente; la utilización del techo verde

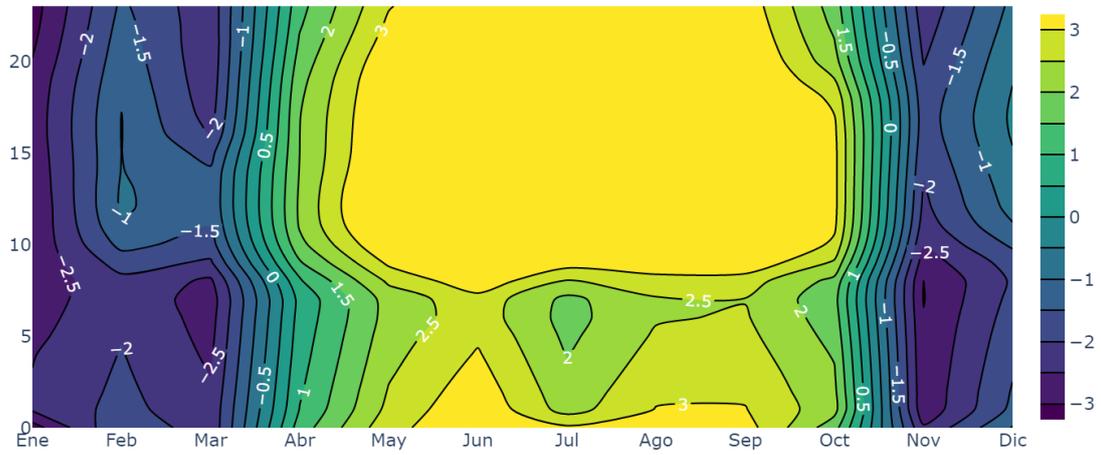


Figura 3.18: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Monterrey.

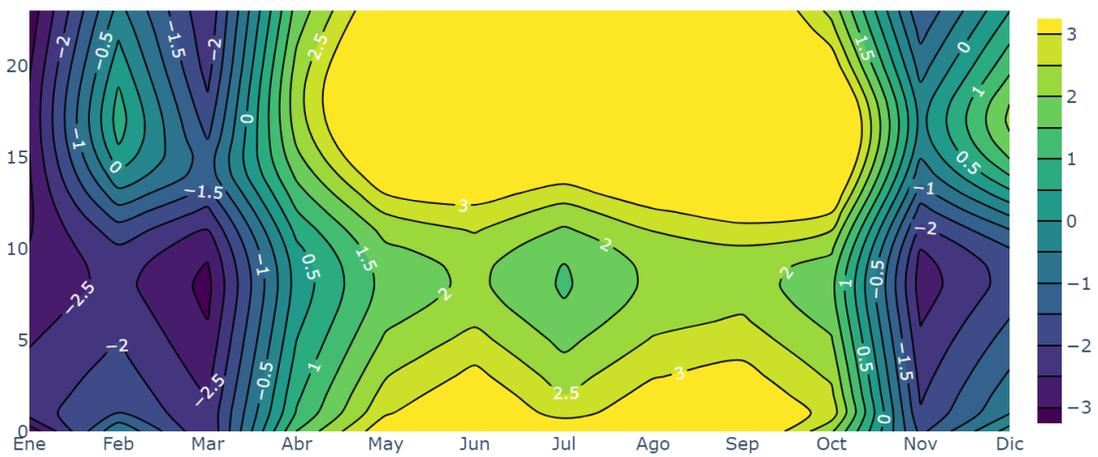


Figura 3.19: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Monterrey.

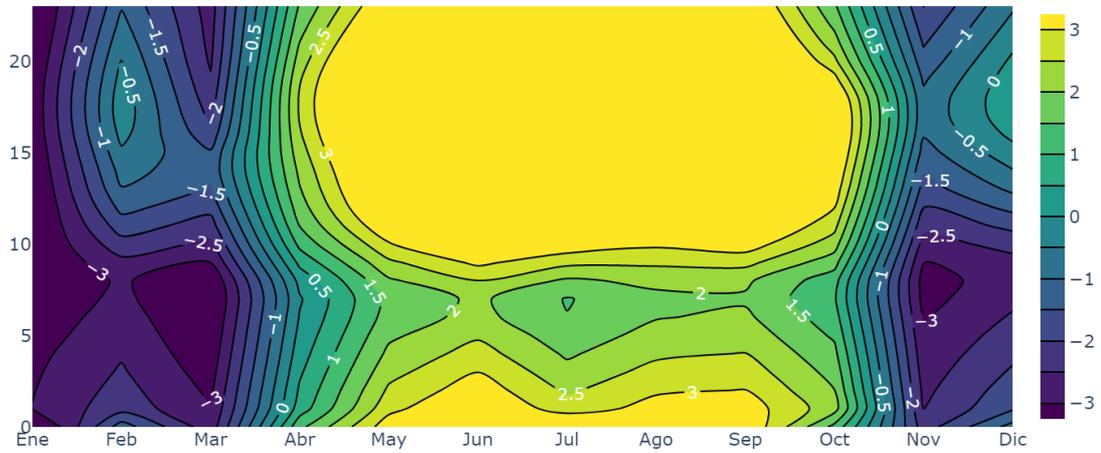


Figura 3.20: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Monterrey.

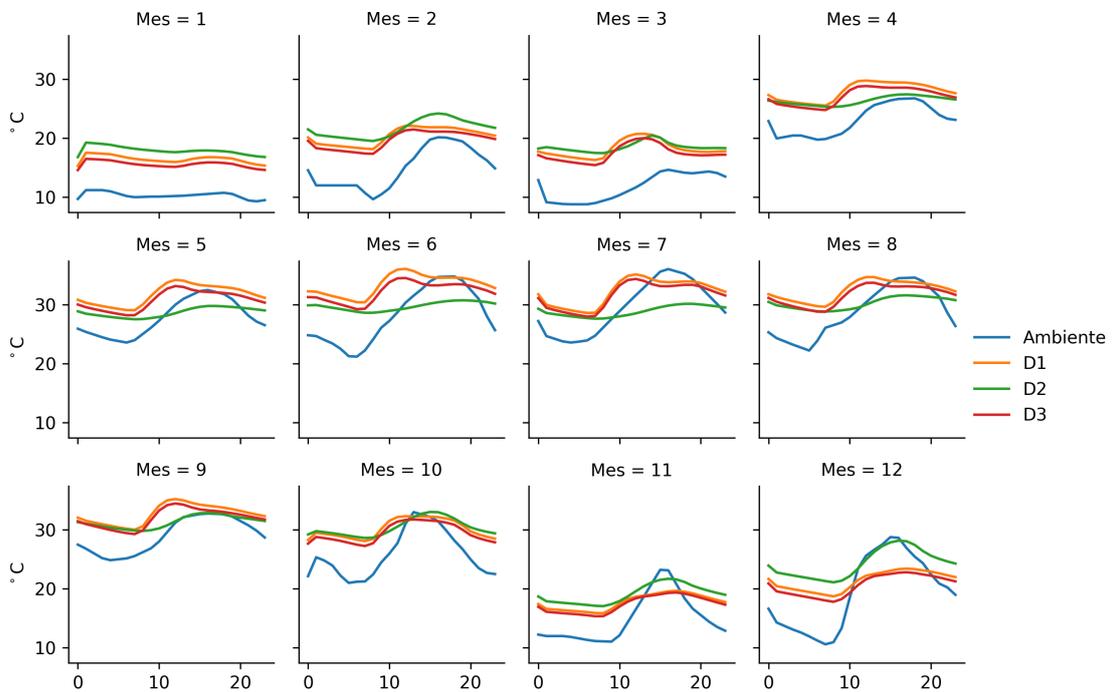


Figura 3.21: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Monterrey.

reduce en promedio 0.6°C , 1.7°C y 1.4°C en los D1, D2 y D3, respectivamente. El techo verde reduce la sensación de calor entre los meses abril y octubre durante las primeras horas del día. En el mes de abril existe la sensación de confort térmico desde las 2 horas hasta las 7 horas 3.22). En el D2 el techo verde logra reducir

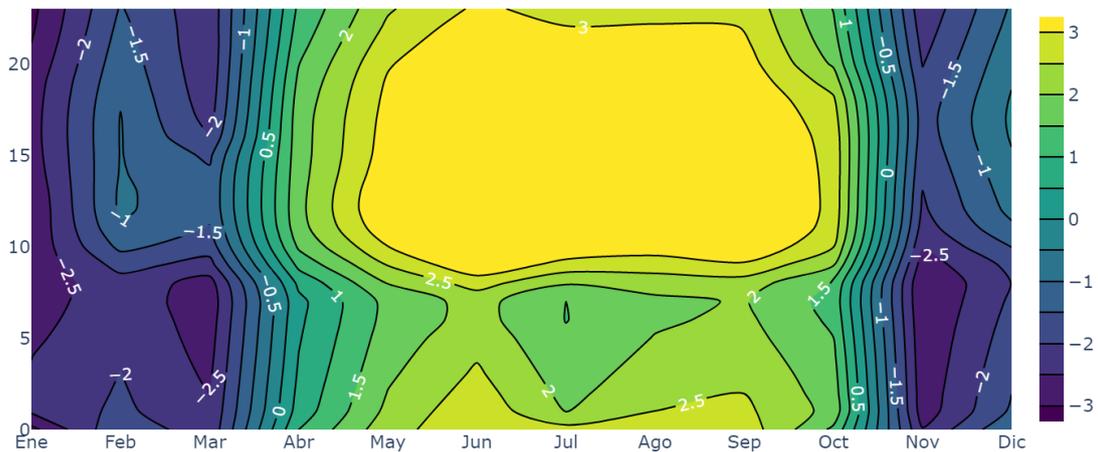


Figura 3.22: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Monterrey.

sensación de calor durante los meses de abril y octubre. El mes de septiembre se presenta la sensación mayor de calor a partir de las 14 horas hasta las 19 horas. Durante los meses de enero, febrero, marzo, noviembre y diciembre sigue existiendo la sensación de frío durante la mayor parte del día (Figura 3.23).

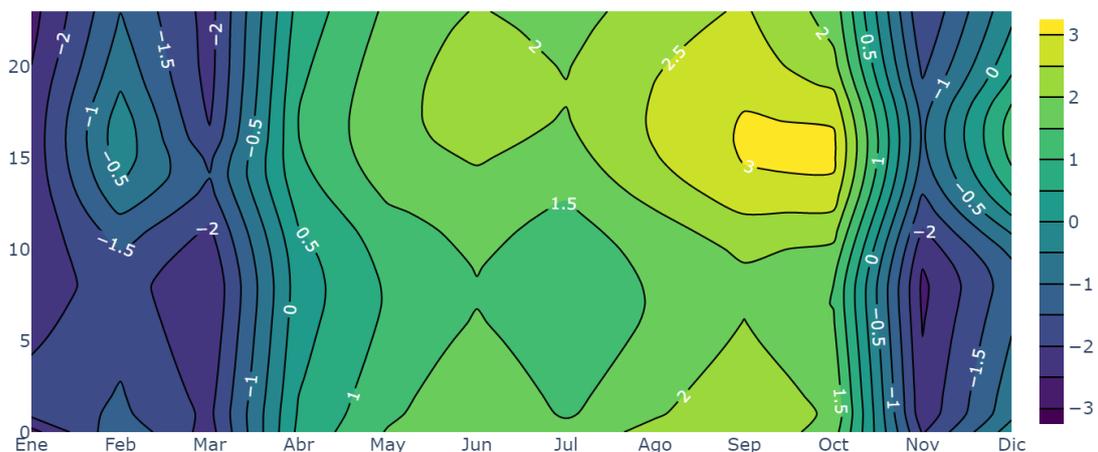


Figura 3.23: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Monterrey.

3. Resultados

En el D3 el techo verde reduce la sensación de calor en las primeras horas del día entre los meses de mayo y octubre. Durante la tarde de estos meses sigue existiendo una sensación de calor importante que se intensifica a partir de 10 horas. Durante los meses de enero, febrero, marzo y diciembre existe una sensación de frío que se intensifica por las mañanas (Figura 3.24).

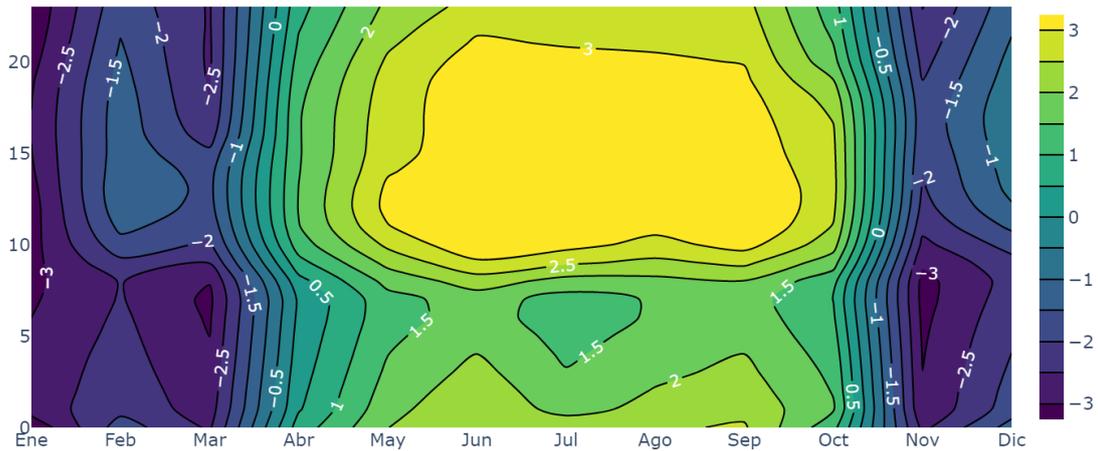


Figura 3.24: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Monterrey.

El techo verde es insuficiente para lograr un confort térmico en los tres dormitorios en Monterrey. Aunque se logra reducir el consumo de energía debido al uso de un aire acondicionado, la reducción anual en enfriamiento para el D1, D2 y D3 es de 9.6%, 43.5% y 35.8%. Mientras que, la reducción en el consumo de energía para la calefacción para el D1, D2 y D3 es de -3.9%, 33.6% y 17.0%, respectivamente (Tabla 3.3). Con esta reducción del consumo de energía por enfriamiento se evitan emitir 100.4 kg, 629.9 kg y 513.9 kg de CO₂e anuales en los dormitorios D1, D2 y D3, respectivamente (Tabla 3.3).

Tabla 3.3: Consumo de energía por climatización en Monterrey.

Mes	Calefacción D1 (kWh)		Enfriamiento D1 (kWh)		Calefacción D2 (kWh)		Enfriamiento D2 (kWh)		Calefacción D3 (kWh)		Enfriamiento D3 (kWh)	
	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde
Ene	145.1	144.5	17.5	16.1	156.0	111.5	79.4	47.8	233.8	200.3	32.7	8.7
Feb	52.0	56.5	52.9	47.0	60.7	39.0	116.1	66.3	101.8	85.7	76.3	35.9
Mar	30.7	34.4	139.8	124.6	43.0	32.8	196.6	98.5	62.9	53.0	191.1	110.5
Abr	1.1	1.7	222.2	198.4	2.6	1.4	285.3	146.5	5.6	3.7	303.7	189.8
May	0.0	0.0	311.5	279.8	0.0	0.0	379.8	192.5	0.2	0.1	431.8	279.9
Jun	0.0	0.0	368.8	333.7	0.0	0.0	430.1	221.0	0.0	0.0	502.6	333.9
Jul	0.0	0.0	378.2	343.7	0.0	0.0	443.6	227.7	0.1	0.0	520.5	344.2
Ago	0.0	0.0	383.8	346.0	0.0	0.0	490.1	267.6	0.0	0.0	531.7	352.8
Sep	0.2	0.2	248.8	229.9	0.6	0.0	339.7	226.3	1.8	0.5	330.1	236.4
Oct	3.8	5.1	194.6	175.2	4.3	0.6	315.0	207.5	16.2	9.7	257.0	166.8
Nov	51.3	53.3	63.5	58.0	59.2	36.5	152.8	107.4	98.6	77.6	88.8	49.0
Dic	83.1	85.7	23.3	21.6	81.3	49.0	98.7	70.0	154.6	130.3	36.0	13.1
Anual	367.3	381.6	2404.9	2174.0	407.7	270.7	3327.3	1879.2	675.7	560.9	3302.2	2120.9
Reducción anual (%)	-3.9		9.6		33.6		43.5		17.0		35.8	
Reducción anual de CO ₂ e (kg)	-6.2		100.4		59.6		629.9		49.9		513.9	

3.4 Tampico

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo convencional en Tampico son 20.2°C , 21.1°C y 20.1°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 38.9°C , 45.7°C y 47.3°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 28.2°C , 39.0°C y 40.6°C , respectivamente (Figura 3.25). La sensación de

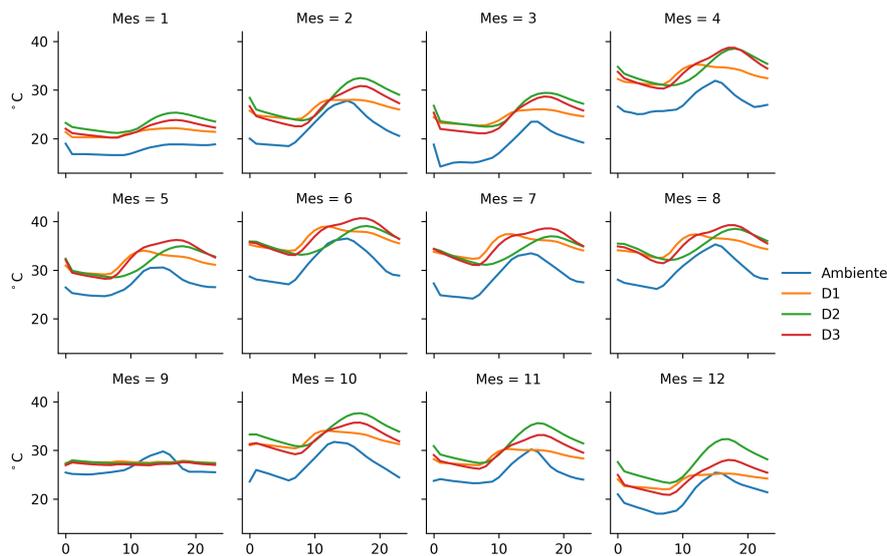


Figura 3.25: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Tampico.

frío en el D1 con techo convencional en Tampico se da principalmente en el mes de enero por la mañana y en la noche a partir de las 20 horas. Mientras que la sensación de calor se da entre los meses de febrero y noviembre principalmente en la tarde, esta sensación de calor se incrementa entre los meses de abril y agosto durante todo el día (Figura 3.26). La sensación frío en el D2 con techo convencional en Tampico se presenta en las primeras horas del día en enero y marzo principalmente. La sensación de calor se experimenta entre los meses de febrero y diciembre por la tarde, esta sensación se incrementa entre los meses de abril y octubre (Figura 3.27).

El D3 con techo convencional en Tampico experimenta frío principalmente en las primeras horas del día en los meses de enero, febrero, marzo y diciembre. Mientras que la sensación de calor se experimenta en los demás meses siendo abril, mayo, junio, julio, agosto y octubre donde se tiene una sensación de calor más extrema (Figura 3.28).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo verde en Tampico son 20.1°C , 20.8°C y 19.7°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 37.6°C , 33.9°C y 36.6°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 28.8°C , 28.4°C y 28.4°C , respectivamente (Figura 3.29).

El techo verde logra reducir la temperatura un máximo en los dormitorios D1, D2 y D3 en 1.6°C , 6.8°C y 5.9°C , respectivamente; mientras que en promedio la temperatura interior en los dormitorios se reduce en 0.7°C , 2.1°C y 1.7°C , respectivamente.

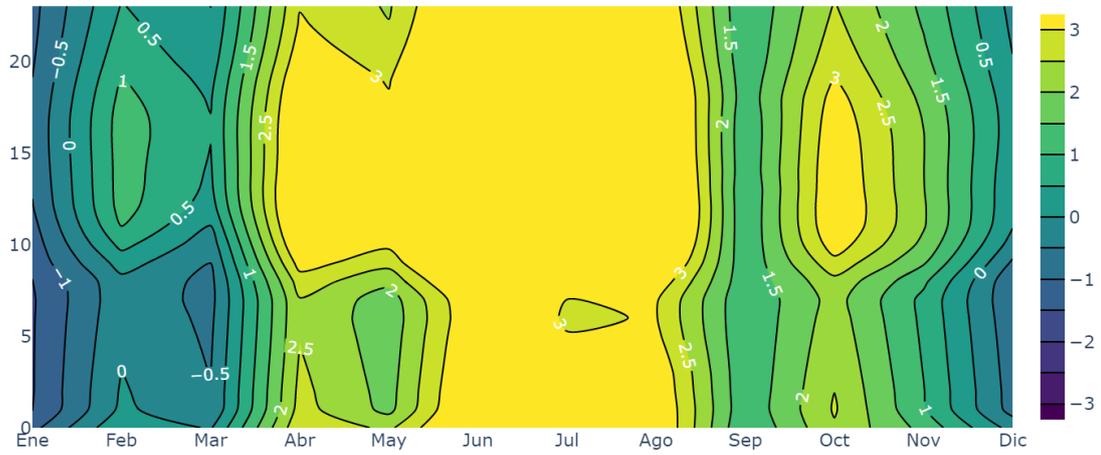


Figura 3.26: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Tampico.

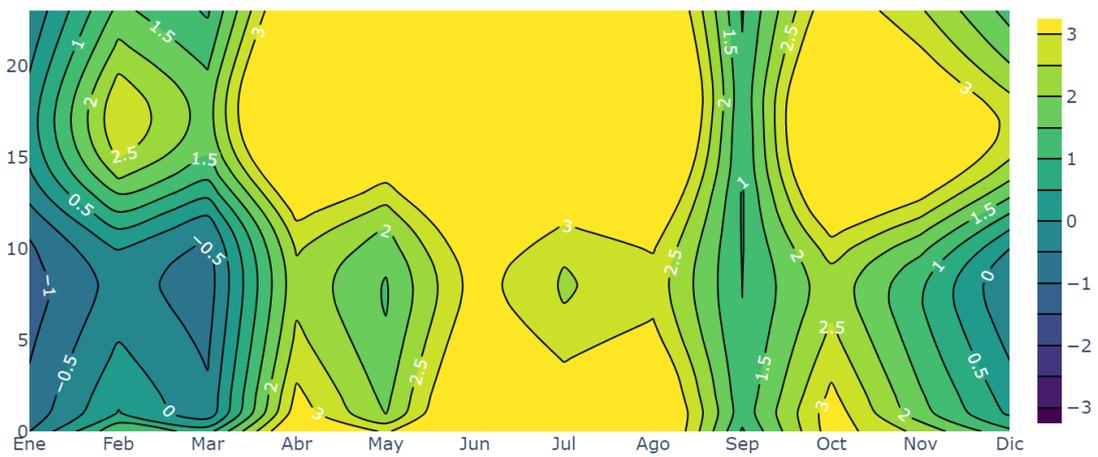


Figura 3.27: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Tampico.

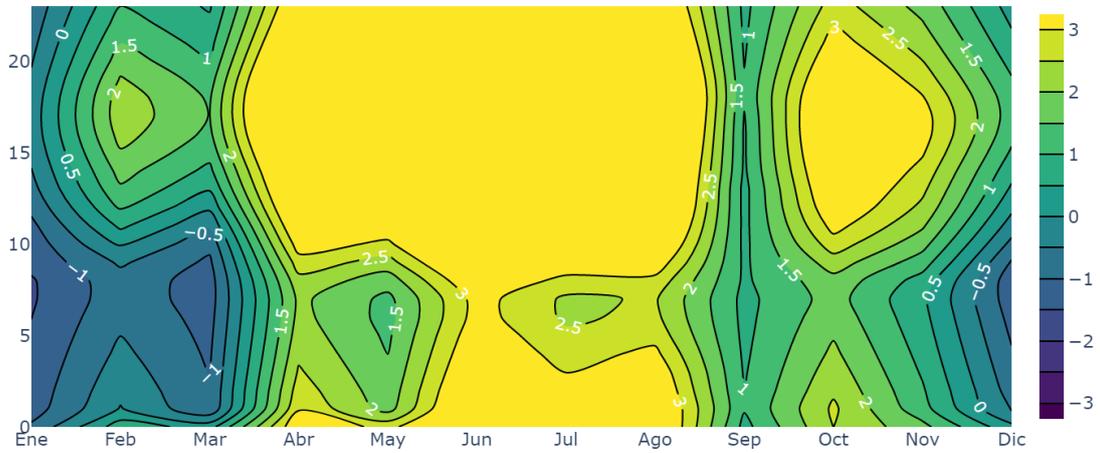


Figura 3.28: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Tampico.

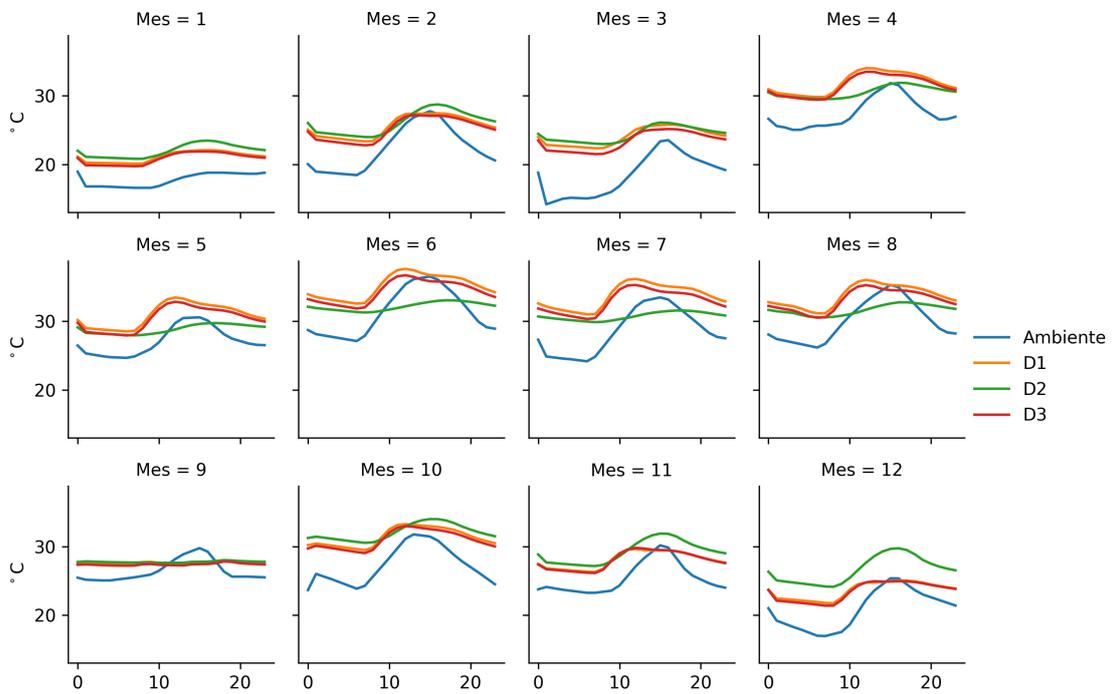


Figura 3.29: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Tampico.

El techo verde no logra impactar positivamente el confort térmico que se siente en el D1, aún existe la sensación de calor entre los meses de abril y noviembre (Figura 3.29). En el D2 con techo verde en tampico no se logra alcanzar a reducir la sensación

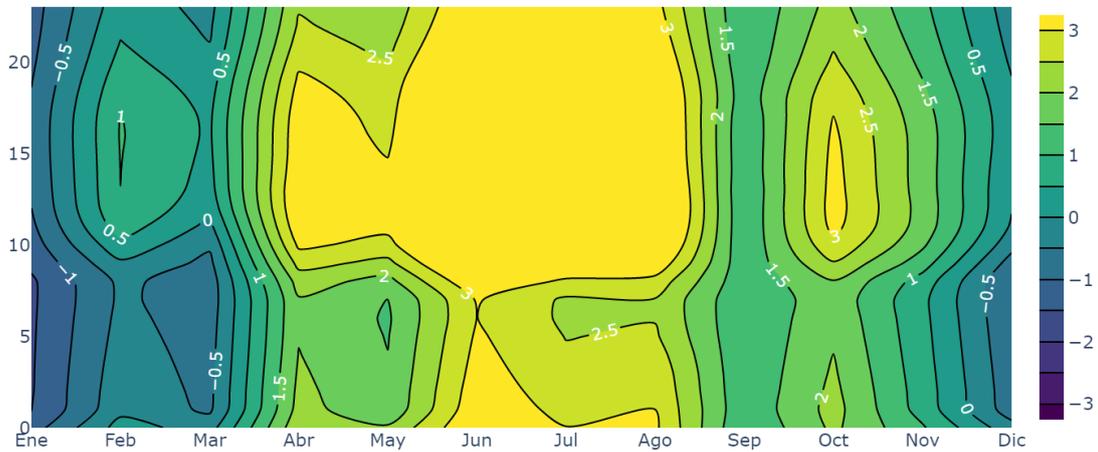


Figura 3.30: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Tampico.

de calor durante los meses de abril y diciembre, esta sensación de calor se experimenta principalmente durante la tarde en estos meses (Figura 3.30). De igual manera el

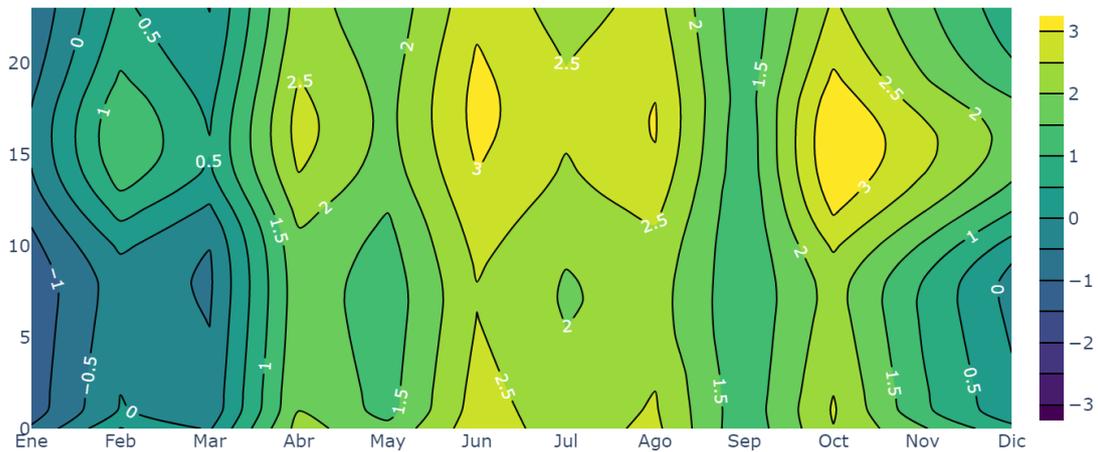


Figura 3.31: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Tampico.

techo verde en tampico no logra reducir la sensación de calor en el D3 durante los meses de abril y noviembre. Existiendo la sensación de calor principalmente entre los meses de abril y agosto en todo el día, esta sensación se empeora durante la tarde (Figura 3.31).

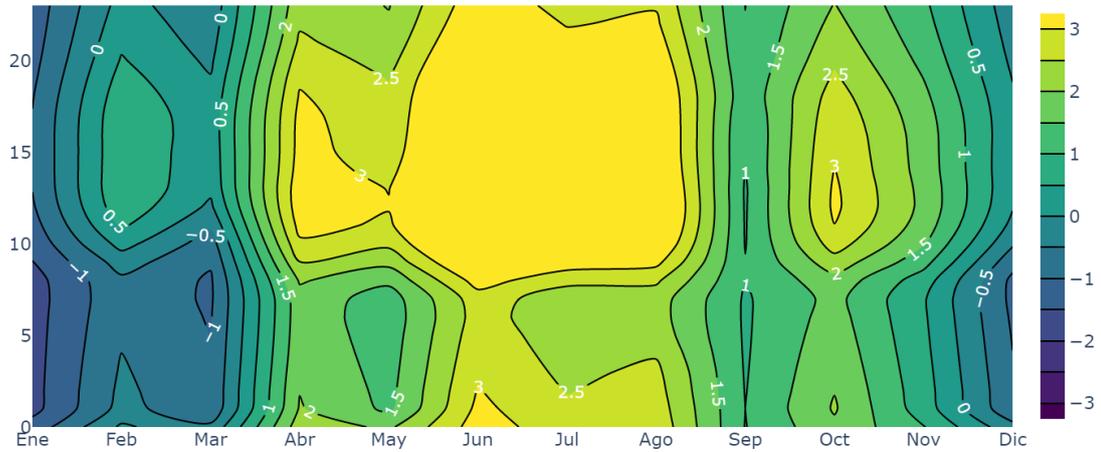


Figura 3.32: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Tampico.

Debido a que el techo verde fue insuficiente para alcanzar un confort térmico en los dormitorios en tampico el uso de un sistema de aire acondicionado se simula. El techo verde logra reducir el consumo de energía debido al enfriamiento en los dormitorios D1, D2 y D3 en un 9.3%, 38.2% y 32.9%, respectivamente (Tabla 3.4). Con esta reducción del consumo de energía por enfriamiento se evitan emitir 121.0 kg, 728.3 kg y 599.4 kg de CO₂e anuales en los dormitorios D1, D2 y D3, respectivamente (Tabla 3.4).

Tabla 3.4: Consumo de energía por climatización en Tampico.

Mes	Calefacción D1 (kWh)		Enfriamiento D1 (kWh)		Calefacción D2 (kWh)		Enfriamiento D2 (kWh)		Calefacción D3 (kWh)		Enfriamiento D3 (kWh)	
	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde
Ene	22.5	24.7	73.6	66.0	25.0	17.6	161.7	115.7	47.3	38.5	102.1	59.9
Feb	8.7	11.9	91.6	81.1	9.3	6.7	167.0	104.7	26.5	23.9	122.2	70.3
Mar	3.6	5.1	179.2	159.1	4.0	2.6	276.5	156.5	10.4	9.2	253.0	154.9
Abr	0.1	0.3	251.6	226.1	0.6	0.0	347.5	197.6	2.5	1.2	354.1	231.5
May	0.0	0.0	365.1	331.2	0.0	0.0	475.7	267.1	0.0	0.0	519.3	349.2
Jun	0.0	0.0	390.6	357.2	0.0	0.0	497.1	289.6	0.0	0.0	549.0	379.9
Jul	0.0	0.0	397.0	362.5	0.0	0.0	499.4	290.9	0.0	0.0	554.2	384.6
Ago	0.0	0.0	409.6	370.3	0.0	0.0	558.8	320.1	0.0	0.0	587.2	393.6
Sep	0.0	0.0	324.7	297.5	0.0	0.0	475.6	308.9	0.0	0.0	454.4	318.2
Oct	0.0	0.0	278.8	253.0	0.0	0.0	461.8	310.7	0.3	0.0	386.2	263.8
Nov	9.3	9.8	140.9	130.0	12.1	5.2	242.5	178.0	26.6	18.0	183.5	126.8
Dic	7.5	8.4	98.5	89.2	7.6	1.6	216.8	166.6	24.3	15.5	128.8	83.4
Anual	51.7	60.3	3001.3	2723.2	58.6	33.7	4380.6	2706.3	138.0	106.4	4194.1	2816.2
Reducción anual (%)	-16.5		9.3		42.5		38.2		22.8		32.9	
Reducción anual de CO ₂ e (kg)	-3.7		121.0		10.8		728.3		13.7		599.4	

3.5 Guanajuato

Los dormitorios D1, D2 y D3 con techo convencional tienen temperaturas mínimas de 17.1 °C, 17.2 °C y 15.1 °C, respectivamente; mientras que sus temperaturas máximas son 31.7 °C, 31.6 °C y 33.4 °C, respectivamente; y sus temperaturas promedio son 24.6 °C, 25.0 °C y 24.7 °C, respectivamente (Figura 3.33).

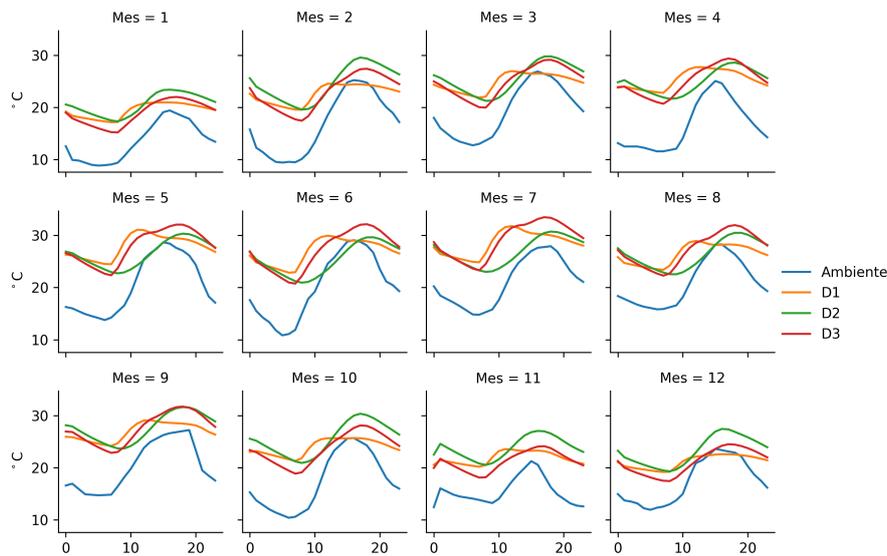


Figura 3.33: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Guanajuato.

En el D1 existe una sensación de frío en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre, esta sensación se encrucece por las mañanas y por la noche. Durante los meses de abril, mayo, junio, julio, agosto y septiembre se presenta una sensación de calor principalmente a partir de las 9 horas, esta sensación se incrementa en los meses de mayo, junio y julio (Figura 3.34).

En el D2 con techo convencional la sensación de frío se experimenta en todo el mes de enero y durante las primeras horas de día en los demás meses. Mientras que la sensación de calor se experimenta entre los meses de febrero y octubre, esta sensación se incrementa durante la tarde a partir de las 13 horas (Figura 3.35).

En el D3 en Guanajuato existe una sensación de frío en los meses de enero, noviembre y diciembre durante todo el día, mientras que en los demás meses existe esta sensación durante las primeras horas de la mañana, las horas en las que se siente frío se reducen durante el verano. La sensación de calor en el D3 se experimenta principalmente por la tarde, siendo los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre los meses más calurosos (Figura 3.36).

Las temperaturas mínimas de los dormitorios D1, D2 y D3 con el techo verde en Guanajuato son 16.6 °C, 18.6 °C y 16.1 °C, respectivamente; mientras que sus temperaturas máximas son 30.9 °C, 27.0 °C y 30.1 °C, respectivamente; y sus temperaturas promedio son 23.8 °C, 22.8 °C y 23.0 °C, respectivamente (Figura 3.37).

El techo verde reduce la temperatura en los dormitorios D1, D2 y D3 en Guanajuato

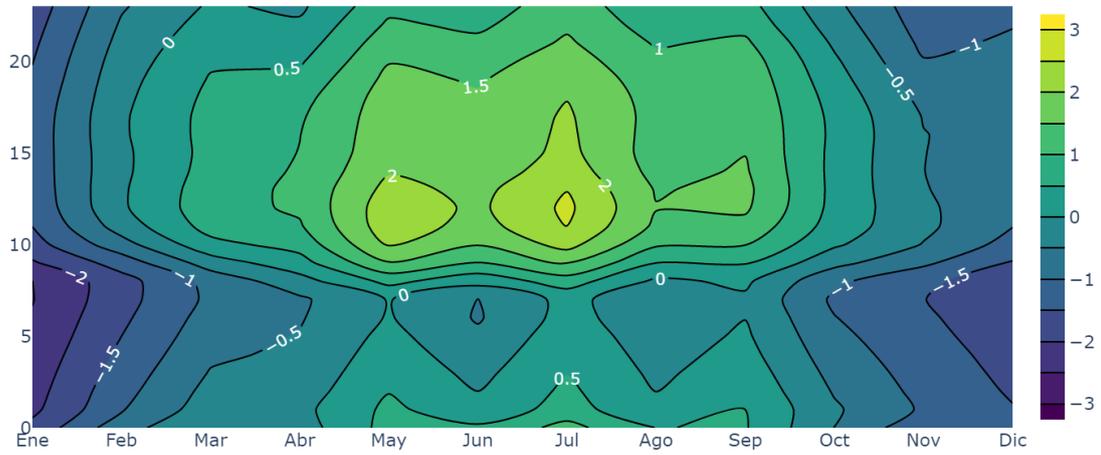


Figura 3.34: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Guanajuato.

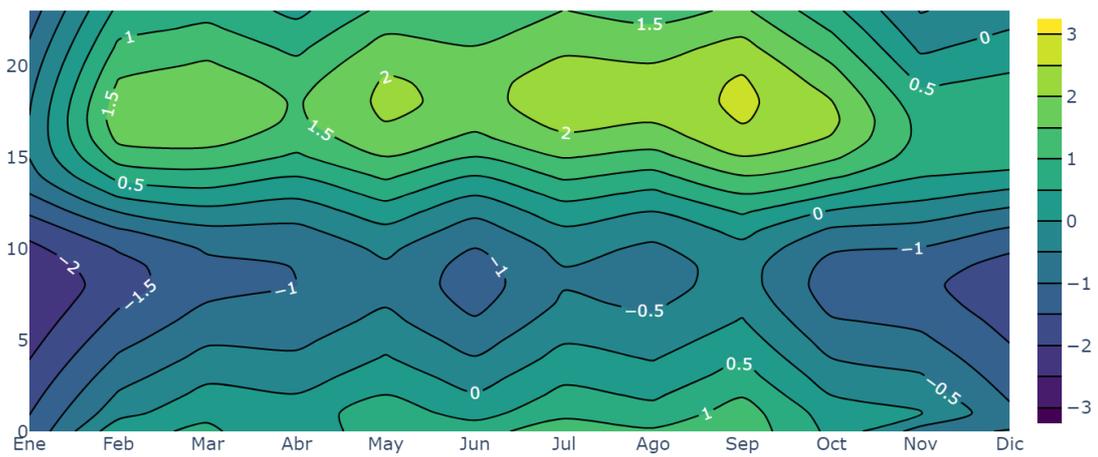


Figura 3.35: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Guanajuato.

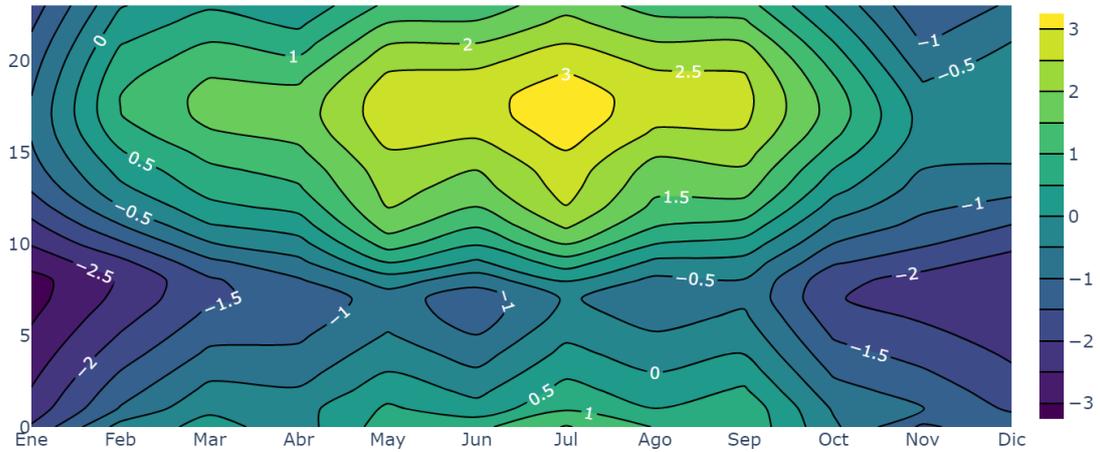


Figura 3.36: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Guanajuato.

un máximo de 1.4°C , 6.5°C y 5.5°C , respectivamente; la utilización del techo verde reduce en promedio 0.8°C , 2.1°C y 1.6°C en los D1, D2 y D3 en Guanajuato.

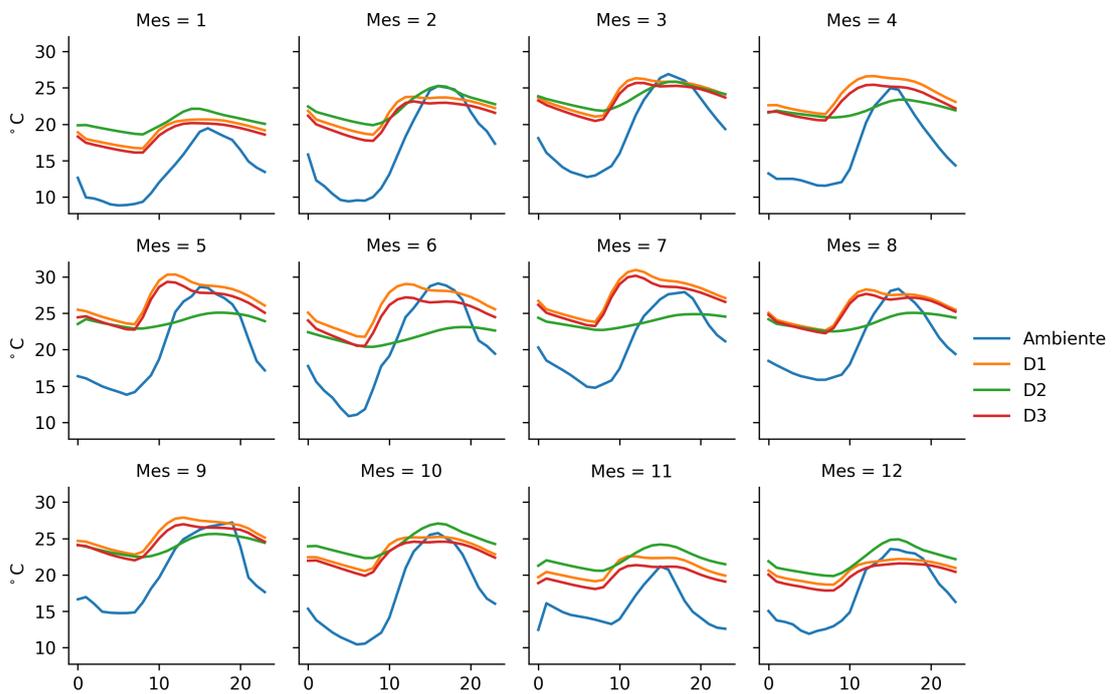


Figura 3.37: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Guanajuato.

En el D1 con techo verde existe a una sensación de calor en los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre. Durante los meses de marzo y abril el techo verde

logra reducir la sensación de calor en el D1, permitiendo llegar a una sensación de confort a partir de las 10 horas.

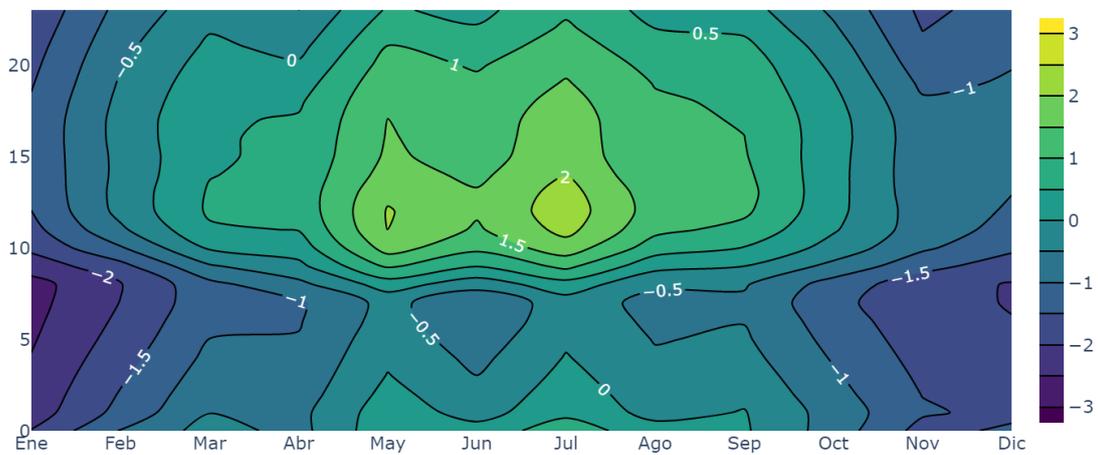


Figura 3.38: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Guanajuato.

En el D2 con techo verde existe la sensación de frío en el mes de enero y en los demás meses durante las primeras horas del día. Entre los meses de febrero y octubre donde existía una sensación de calor con el techo convencional no se experimenta esta sensación con el techo verde en el D2, es decir, existe confort térmico durante estos meses por la tarde debido a la utilización de un techo verde (Figura 3.39).

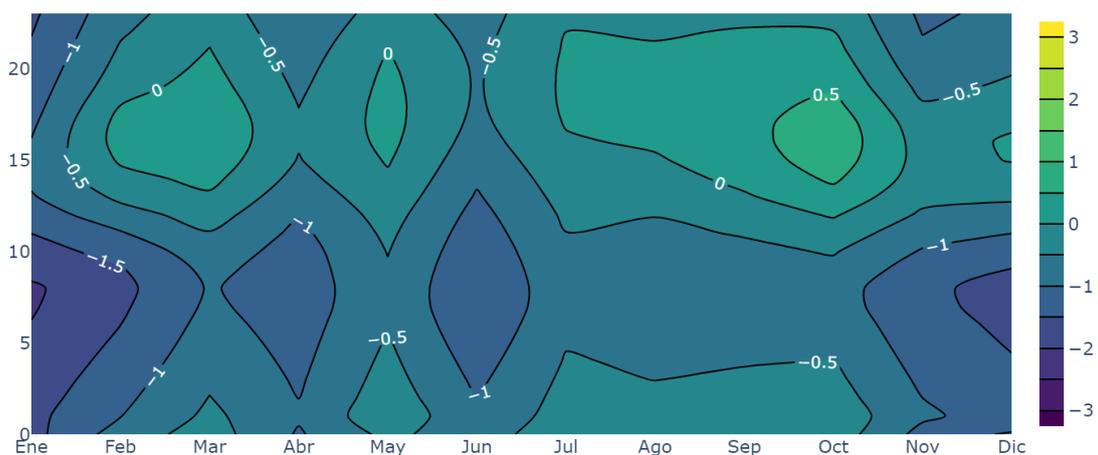


Figura 3.39: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Guanajuato.

En el D3 el techo verde reduce la sensación de calor, siendo los meses de marzo,

abril y septiembre el efecto del techo verde logra alcanzar el confort térmico en las horas donde existe una sensación de calor con el techo convencional (Figura 3.40).

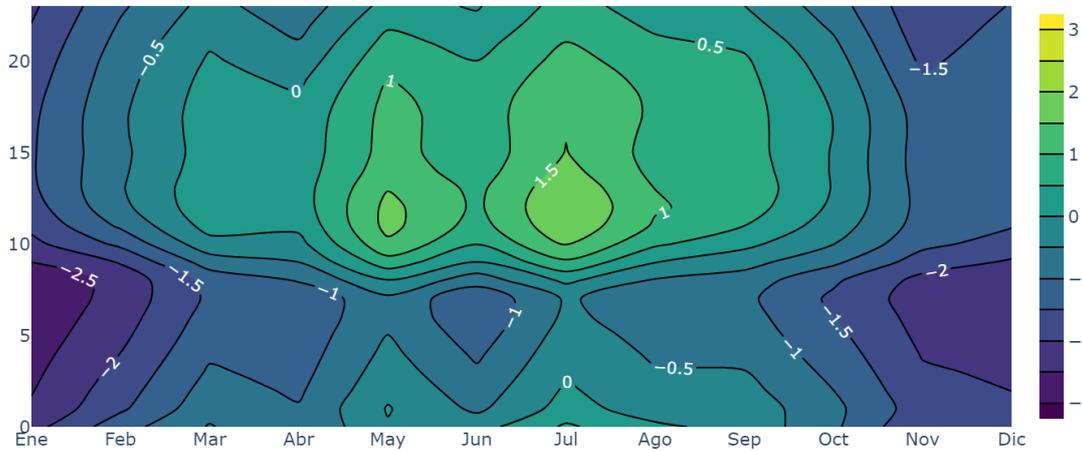


Figura 3.40: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Guanajuato.

3.6 Querétaro

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo convencional en Querétaro son 16.8°C , 17.2°C y 15.0°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 31.6°C , 31.6°C y 33.7°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura es de 23.3°C , 23.9°C y 23.4°C , respectivamente (Figura 3.41).

En el D1 con techo convencional en Querétaro existe la sensación de frío durante los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre, esta sensación se intensifica en las primeras horas del día. El mes de junio es donde se presenta la mayor sensación calor a las 12 horas (Figura 3.42).

En el D2 con techo convencional en Querétaro se presenta una sensación de frío en principalmente en las primeras horas del día durante gran parte del año, siendo enero donde se experimenta frío durante todo el día. La sensación de calor se presenta entre los meses de febrero y octubre a partir de las 14 horas (Figura 3.43). En el D3 con techo convencional en Querétaro se presenta una mayor sensación de calor en comparación con los D1 y D2. Esta sensación de calor se presenta en el mes de junio entre las 10 horas hasta las 0 horas. En marzo, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre se experimenta una sensación de calor durante la tarde. El mes más frío es enero; esta sensación de frío se experimenta en los demás meses, intensificándose durante las primeras horas del día (Figura 3.44).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo verde en Querétaro son 16.3°C , 17.3°C y 15.6°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 30.8°C , 27.5°C y 29.8°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura son 22.5°C , 21.7°C y 21.7°C , respectivamente (Figura 3.45).

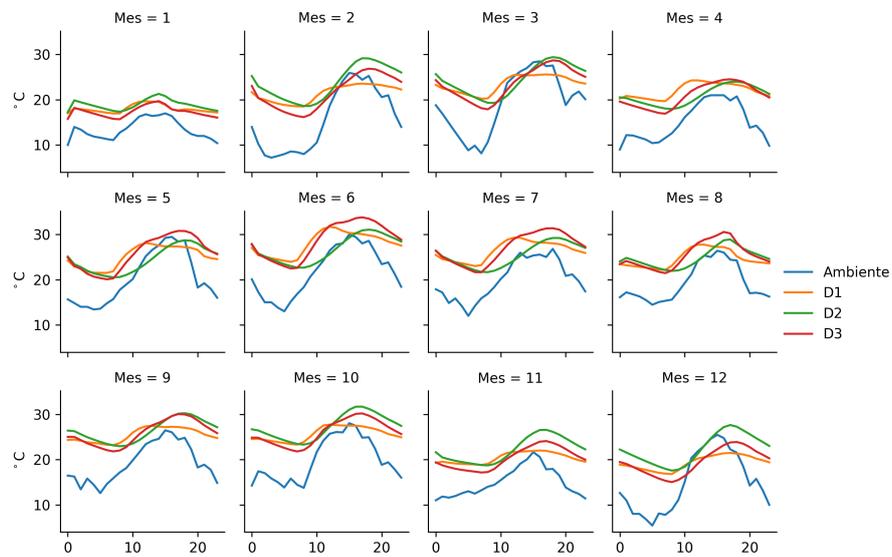


Figura 3.41: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Querétaro.

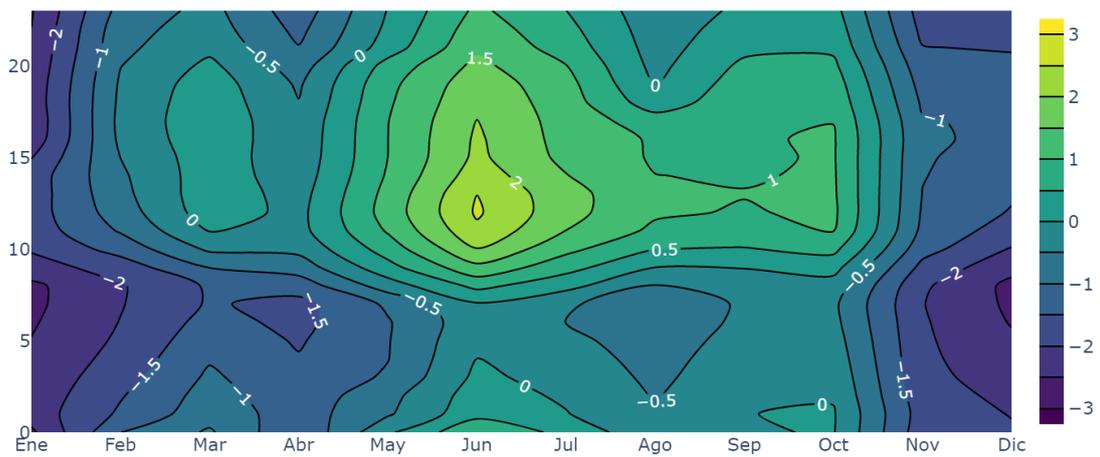


Figura 3.42: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Querétaro.

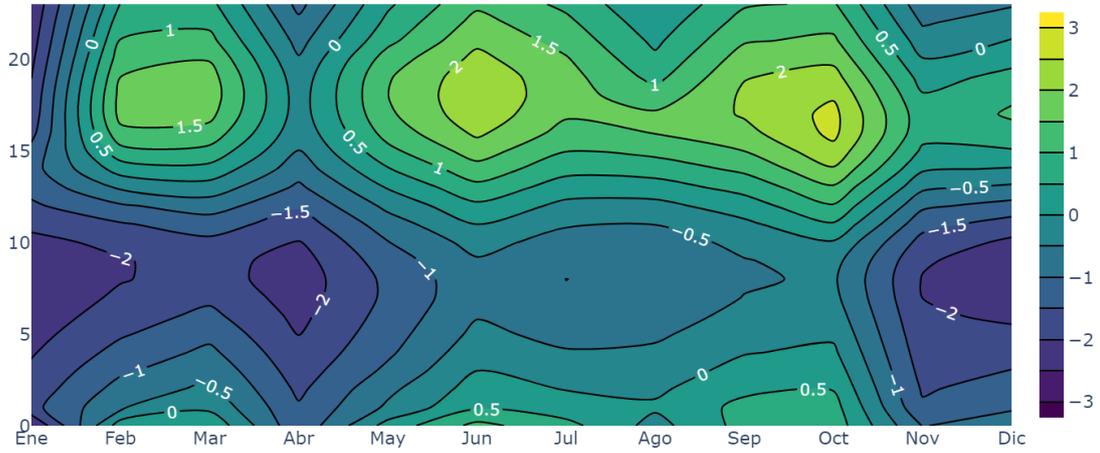


Figura 3.43: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Querétaro.

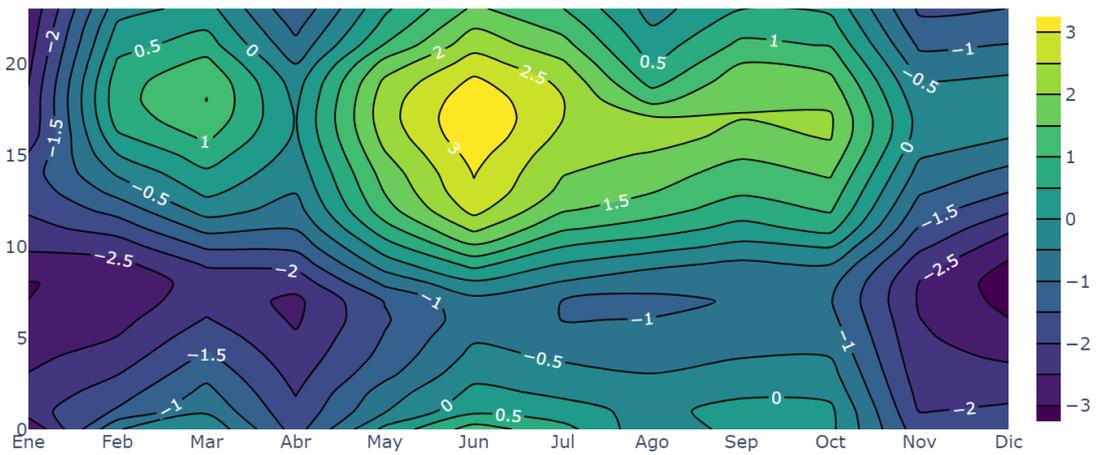


Figura 3.44: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Querétaro.

El techo verde reduce la temperatura interior en los D1, D2 y D3 en Querétaro un máximo de 1.4°C , 6.6°C y 5.5°C , respectivamente; la utilización del techo verde reduce en promedio 0.7°C , 2.1°C y 1.7°C en los D1, D2 y D3.

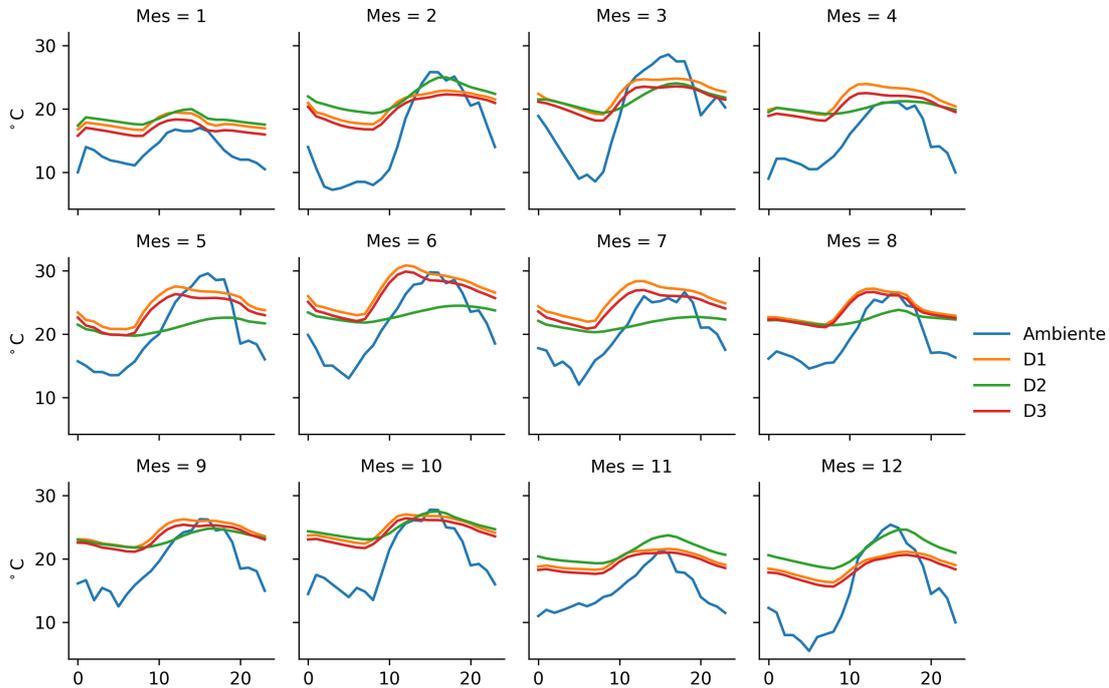


Figura 3.45: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Querétaro.

El techo verde logra reducir la sensación de calor en el D1 en Querétaro durante los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. Durante el mes de junio esta sensación de calor se incrementa a partir de 10. La sensación que se tiene más tiempo es de frío principalmente por las mañanas y durante los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre (Figura 3.46).

En el D2 en Querétaro el techo verde logra reducir la sensación de calor los meses mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. Esta sensación de calor solamente se experimenta a las 16 horas del mes de octubre. En las mañanas de todo el año se experimente una sensación de frío principalmente en los meses de enero, noviembre y diciembre (Figura 3.47). En el D3 el techo verde logra reducir la sensación de calor en Querétaro durante los meses de marzo, mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre. Esta sensación de calor todavía está presente en el mes de junio entre las 10 y 19 horas. Durante las mañanas se presenta una sensación de frío durante todo el año, esta sensación se intensifica en los meses de enero, febrero, noviembre y diciembre (Figura 3.48).

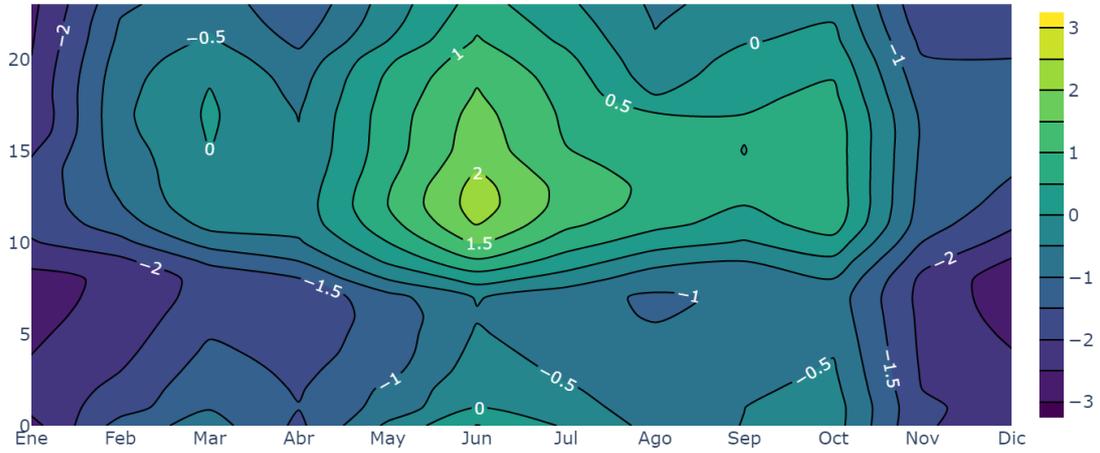


Figura 3.46: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Querétaro.

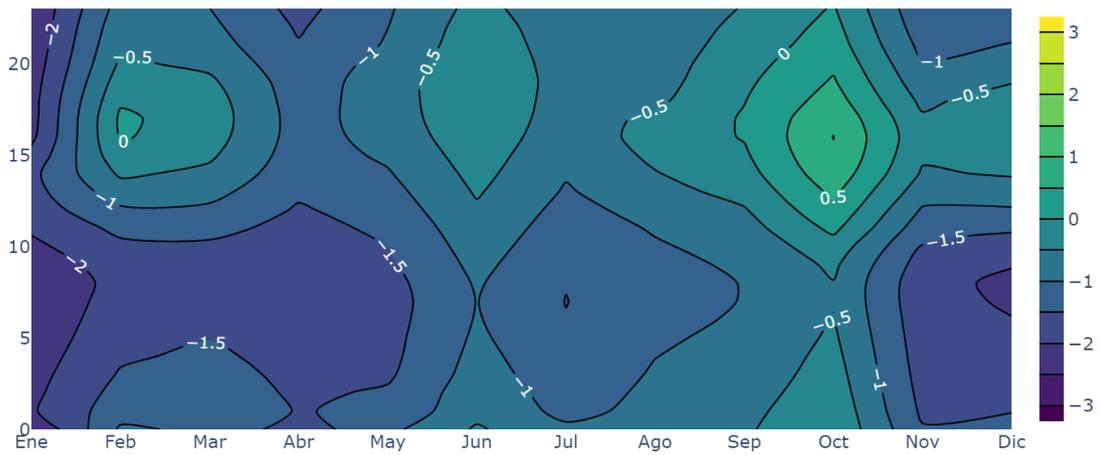


Figura 3.47: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Querétaro.

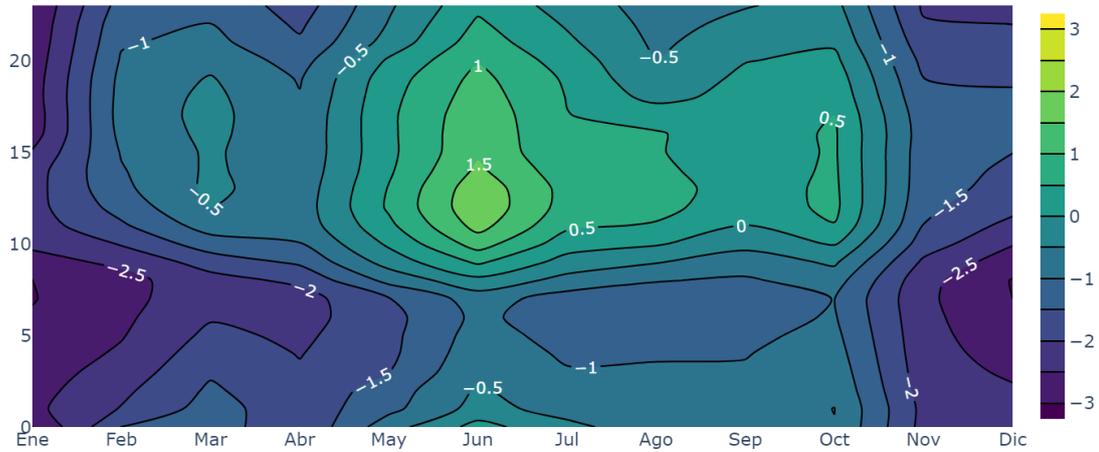


Figura 3.48: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Querétaro.

3.7 Pachuca

Los dormitorios D1, D2 y D3 con techo convencional en Pachuca tienen temperaturas mínimas de 15.1°C , 15.5°C y 13.5°C , respectivamente; mientras que sus temperaturas máximas son 29.0°C , 29.8°C y 30.7°C , respectivamente; y sus temperaturas promedio son 21.6°C , 22.7°C y 22.1°C , respectivamente (Figura 3.49).

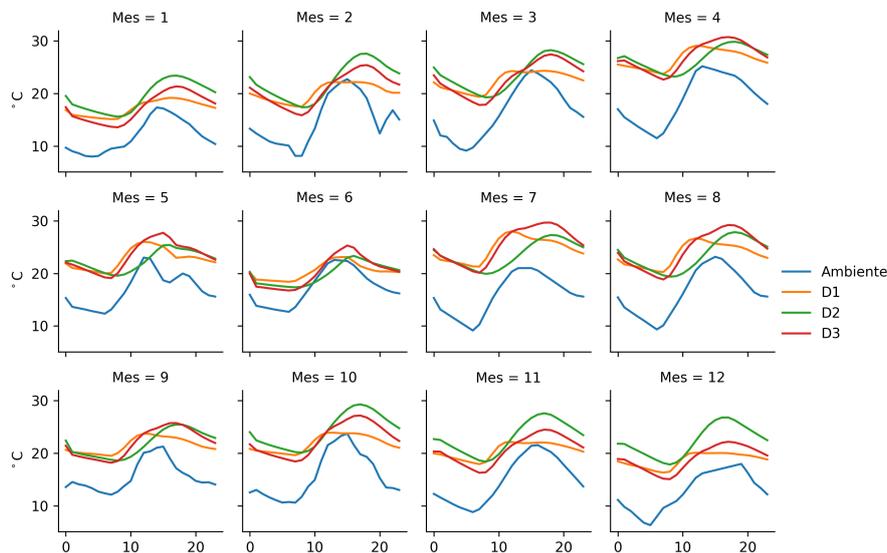


Figura 3.49: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Pachuca.

En el D1 con techo convencional en Pachuca se tiene una sensación de frío durante la mayoría del año excepto en los meses de abril, junio y julio por la tarde. Los meses

3. Resultados

con una mayor sensación de frío son diciembre y enero, esta sensación se incrementa durante las primeras horas del día (Figura 3.50).

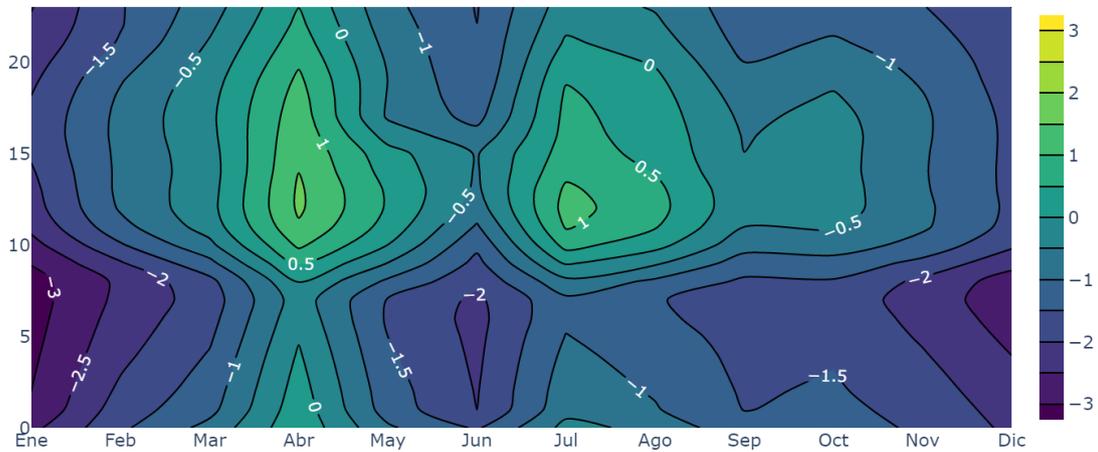


Figura 3.50: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Pachuca.

En el D2 con techo convencional en Pachuca existe una sensación ligeramente cálida por la tarde en los meses de febrero, marzo, abril, julio, agosto, octubre y noviembre. En todo el año excepto en mes de abril, se experimenta una sensación de frío por las mañanas esta sensación se incrementa en el mes de enero (Figura 3.51). En el

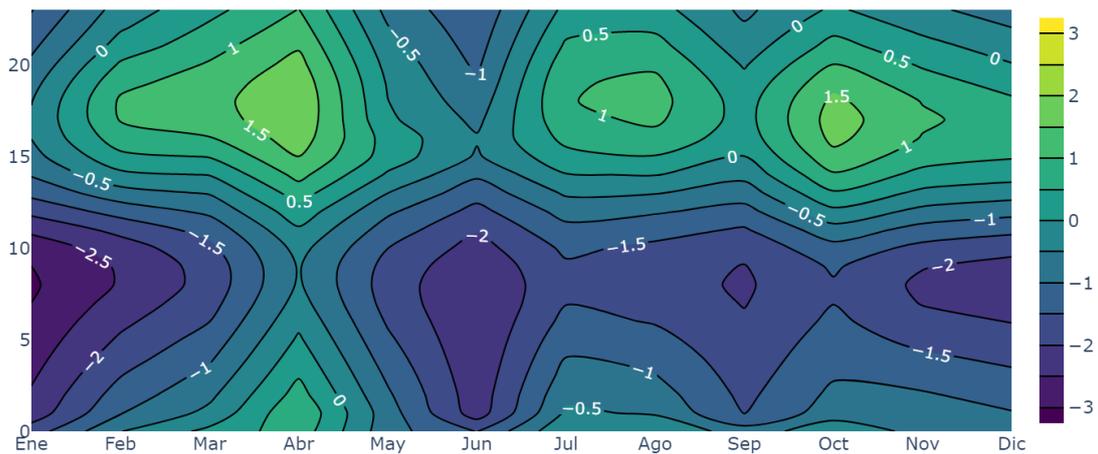


Figura 3.51: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Pachuca.

D3 con techo convencional en Pachuca se experimenta una sensación cálida por la tarde durante los meses de abril, julio y agosto. Durante las primeras horas del día

se experimenta una sensación de frío durante todo el año excepto en abril. Los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero son donde se tiene una sensación de frío mayor (Figura 3.52).

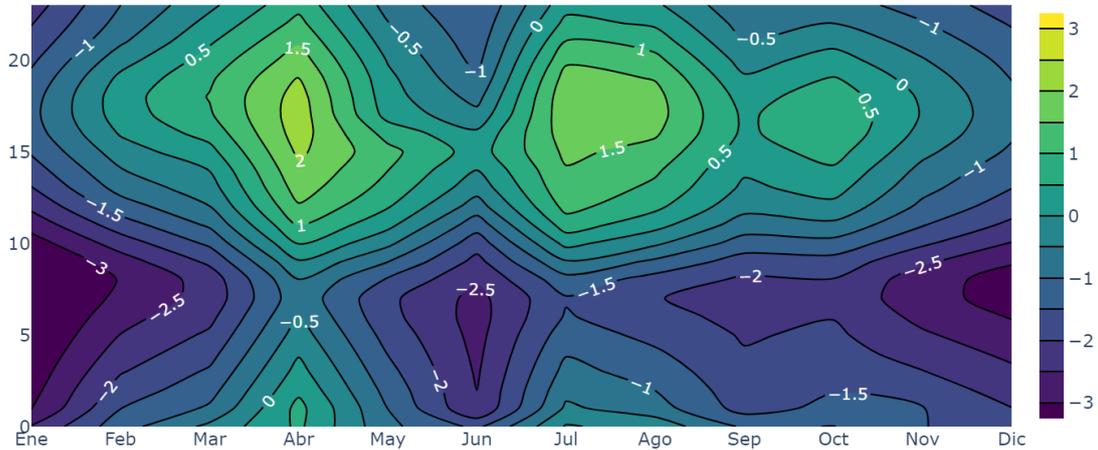


Figura 3.52: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Pachuca.

Las temperaturas mínimas de los dormitorios D1, D2 y D3 con el techo verde en Pachuca son 14.8°C , 16.6°C y 14.3°C , respectivamente; mientras que sus temperaturas máximas son 27.5°C , 24.8°C y 26.6°C , respectivamente; y sus temperaturas promedio son 21.0°C , 20.6°C y 20.5°C , respectivamente (Figura 3.53).

El techo verde reduce la temperatura en los dormitorios D1, D2 y D3 en Guanajuato un máximo de 1.7°C , 6.2°C y 5.4°C , respectivamente; la utilización del techo verde reduce en promedio 0.6°C , 2.0°C y 1.6°C en los D1, D2 y D3 en Pachuca.

Con el techo verde el D1 en Pachuca experimenta en su mayoría frío durante todo el año excepto en tarde del mes de abril donde se tiene una sensación ligeramente cálida. Durante los meses de diciembre, enero y febrero se tiene una mayor sensación de frío, esta sensación se incrementa durante las primeras horas del día (Figura 3.54).

El techo verde logra reducir la sensación de calor que se experimentaba en el D2 con un techo convencional, su efecto es tal que durante todo el año en el D2 se tiene una sensación de frío (Figura 3.55). De igual manera que en el D2, el D3 se presenta frío en la mayoría del año con un techo verde, excepto durante el mes de abril y julio.

Durante los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero se experimenta el mayor frío, esta sensación se incrementa durante las primeras horas del día (Figura 3.56).

El techo verde logra reducir el consumo de energía por enfriamiento en los dormitorios D1, D2 y D3 en un 14.5% , 83.3% y 60.8% ; mientras que la reducción en el consumo de energía por calefacción es de -9.9% , 0.4% y 5.5% (Tabla 3.5). Con esta reducción del consumo de energía por enfriamiento se evitan emitir 39.7 kg , 318.4 kg y 262.0 kg de CO_2e anuales en los dormitorios D1, D2 y D3, respectivamente (Tabla 3.5).

3. Resultados

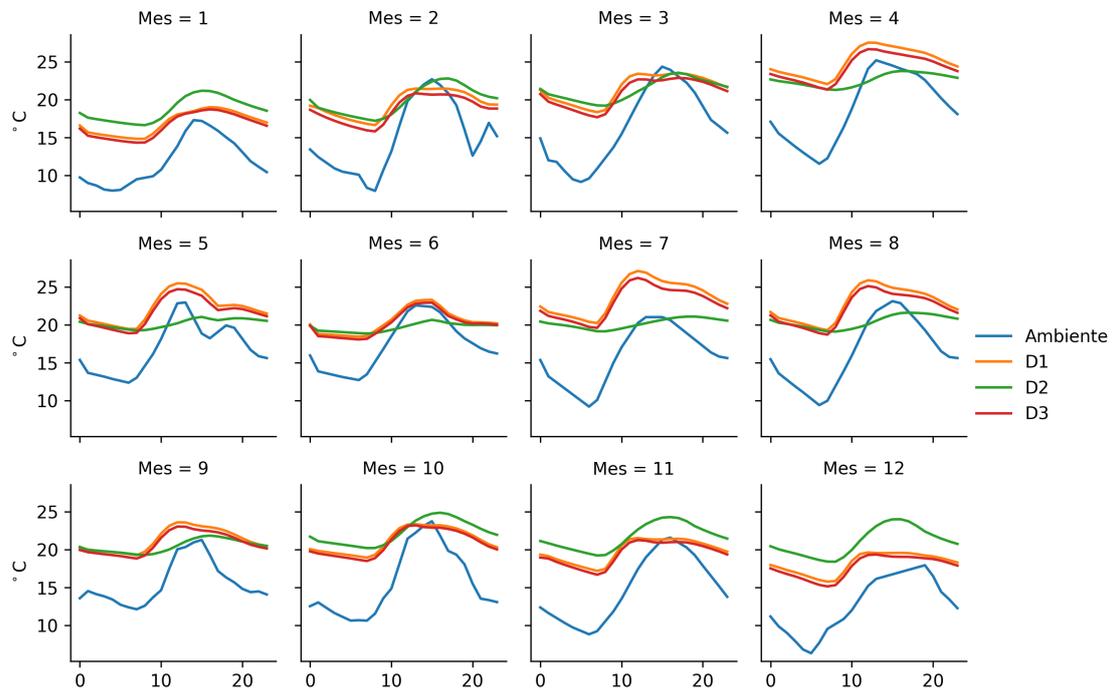


Figura 3.53: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Pachuca.

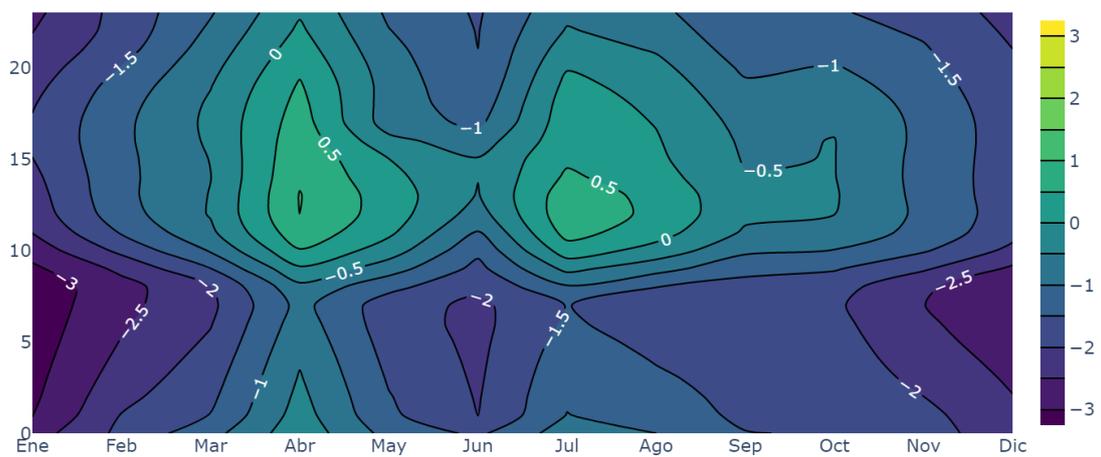


Figura 3.54: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Pachuca.

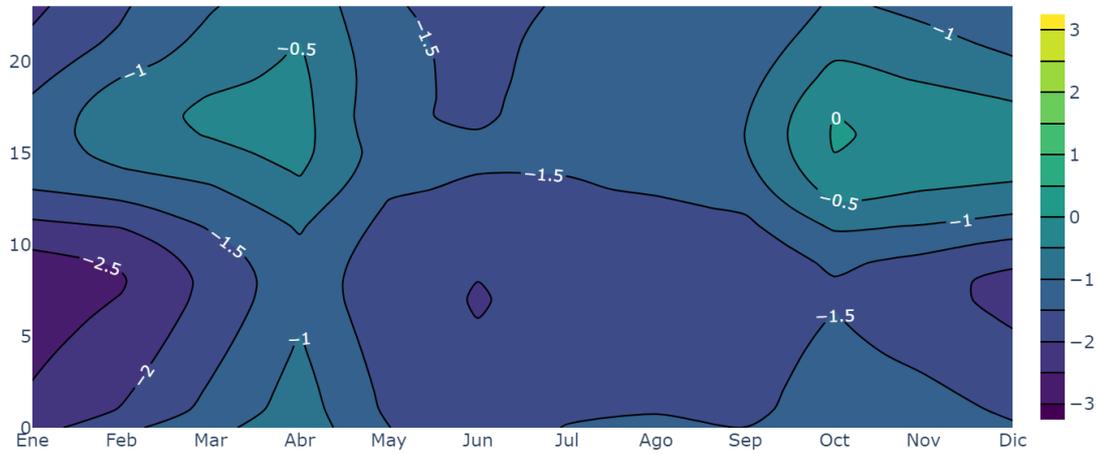


Figura 3.55: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Pachuca.

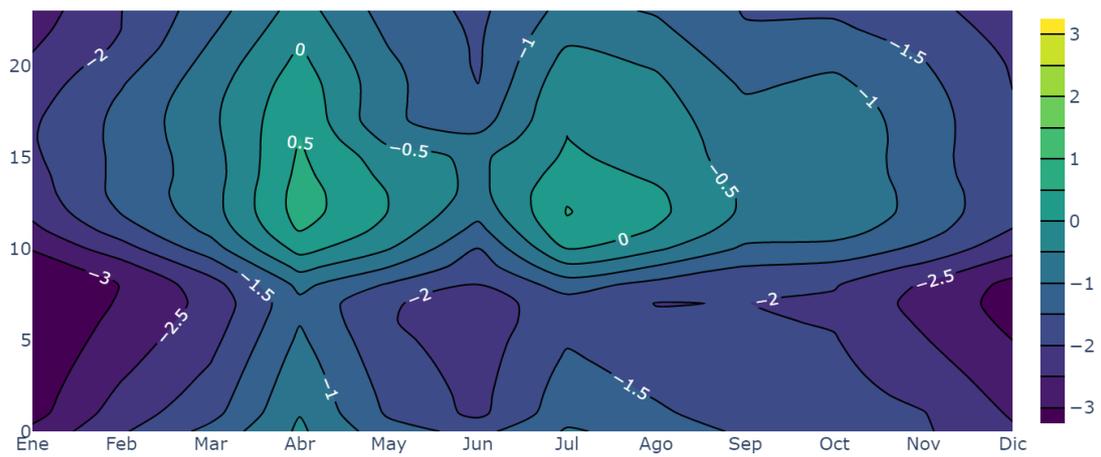


Figura 3.56: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Pachuca.

Tabla 3.5: Consumo de energía por climatización en Pachuca.

Mes	Calefacción D1 (kWh)		Enfriamiento D1 (kWh)		Calefacción D2 (kWh)		Enfriamiento D2 (kWh)		Calefacción D3 (kWh)		Enfriamiento D3 (kWh)	
	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde
Ene	190.3	191.5	0.8	0.6	193.9	149.7	42.2	16.4	284.6	258.6	8.8	0.0
Feb	137.4	141.6	15.2	12.5	163.8	143.5	48.2	10.2	212.9	197.9	29.9	3.9
Mar	86.9	99.8	41.1	34.7	105.1	115.4	73.0	6.9	141.6	142.2	69.7	16.4
Abr	29.4	41.6	113.3	94.7	45.6	67.1	130.6	15.3	59.0	62.7	171.6	71.9
May	22.6	33.6	128.2	107.9	38.5	68.0	119.0	3.4	47.2	49.9	190.5	86.2
Jun	40.7	48.4	87.6	76.3	68.2	82.2	68.5	1.4	75.6	64.5	125.1	60.8
Jul	45.3	53.7	75.2	66.6	74.6	95.2	57.8	0.0	79.4	71.7	111.4	52.3
Ago	37.0	48.0	76.0	65.8	58.8	82.1	62.1	0.1	67.1	63.6	107.4	50.5
Sep	52.8	63.4	46.7	40.6	63.9	70.7	65.0	8.0	86.4	83.6	75.5	29.0
Oct	74.1	86.2	36.1	30.7	72.9	68.6	91.6	29.5	118.6	116.7	64.8	16.5
Nov	141.7	146.3	7.8	6.7	140.1	108.6	56.2	23.4	219.3	199.4	22.8	1.5
Dec	157.0	161.8	0.4	0.2	139.1	108.7	64.5	31.8	232.4	223.5	13.7	0.0
Anual	1015.2	1115.9	628.6	537.4	1164.6	1159.8	878.5	146.6	1624.1	1534.2	991.2	388.8
Reducción anual (%)	-9.9		14.5		0.4		83.3		5.5		60.8	
Reducción anual de CO ₂ e (kg)	-43.8		39.7		2.1		318.4		39.1		262.0	

3.8 Cancún

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo convencional en Cancún son 22.3°C , 22.7°C y 20.4°C , respectivamente; sus temperaturas máximas son 37.5°C , 38.1°C y 39.0°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura es de 30.4°C , 31.0°C y 30.5°C , respectivamente (Figura 3.57).

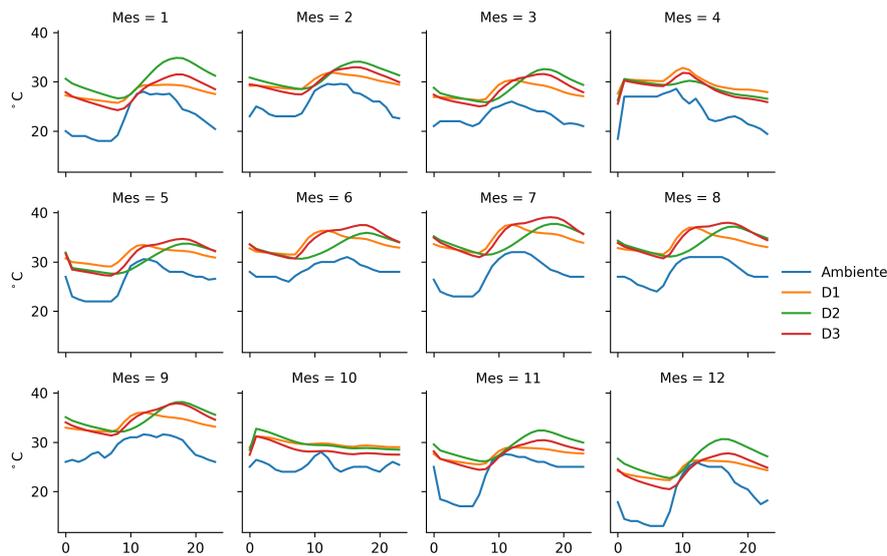


Figura 3.57: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo convencional en Cancún.

En el D1 con techo convencional en Cancún existe una sensación de calor durante todo el año en todo el día excepto en el mes de diciembre, en este mes durante la mañana se tiene una ligera sensación de frío. La sensación de calor se intensifica en entre los meses de mayo y septiembre, especialmente durante la tarde (Figura 3.2). En el D2 con techo convencional en Cancún la sensación de calor se experimenta durante todo el año. En los mes de enero y febrero se tiene una sensación térmica caliente, esta sensación también ocurre entre los meses de mayo y septiembre durante gran parte del día (Figura 3.59). En el D3 con techo convencional en Cancún, la sensación de calor se experimenta igualmente durante todo el año, siendo mayo, junio, julio, agosto y septiembre los meses con una mayor sensación de calor. Durante los meses de diciembre y enero se reduce esta sensación de calor por las mañanas (Figura 3.60).

Las temperaturas mínimas de los D1, D2 y D3 con techo verde en Cancún son 21.9°C , 23.8°C y 21.3°C , respectivamente; sus temperaturas máximas es de 36.2°C , 33.0°C y 35.4°C , respectivamente; mientras que sus promedios de temperatura es de 29.7°C , 29.2°C y 29.1°C , respectivamente (Figura 3.61).

El techo verde reduce la temperatura interior en los D1, D2 y D3 en Cancún un máximo de 1.5°C , 6.3°C y 5.3°C , respectivamente; la utilización del techo verde reduce en promedio 0.6°C , 1.7°C y 1.3°C en los D1, D2 y D3. El techo verde no reduce significativamente la sensación de calor en el D1. Durante las mañanas de

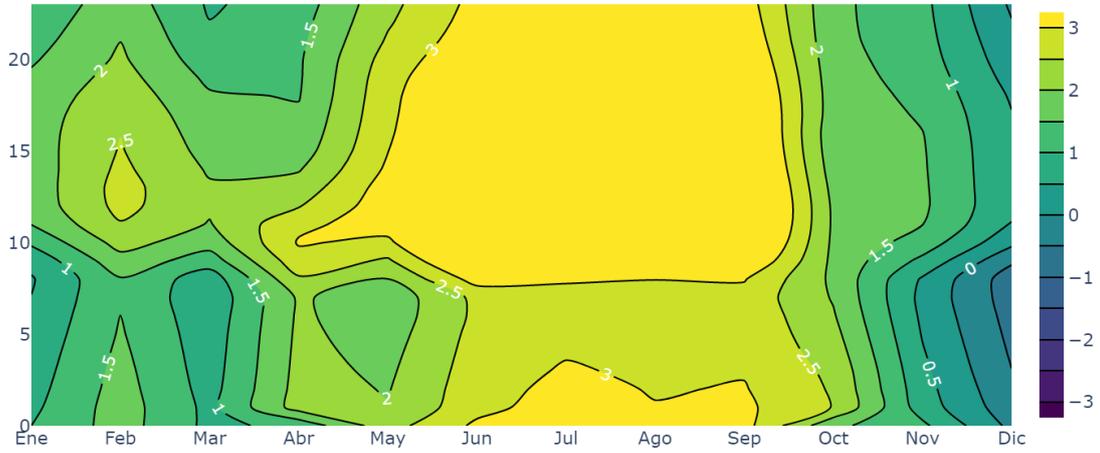


Figura 3.58: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo convencional en Cancún.

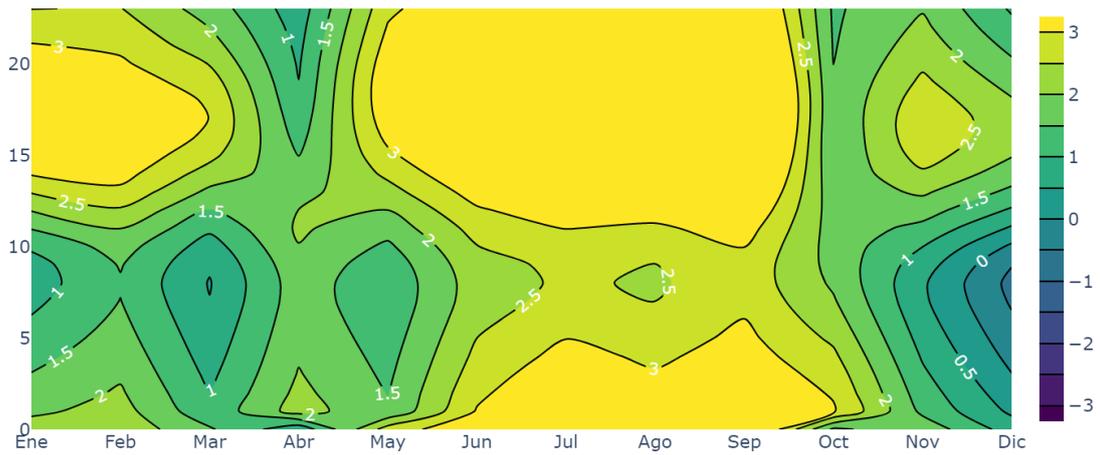


Figura 3.59: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo convencional en Cancún.

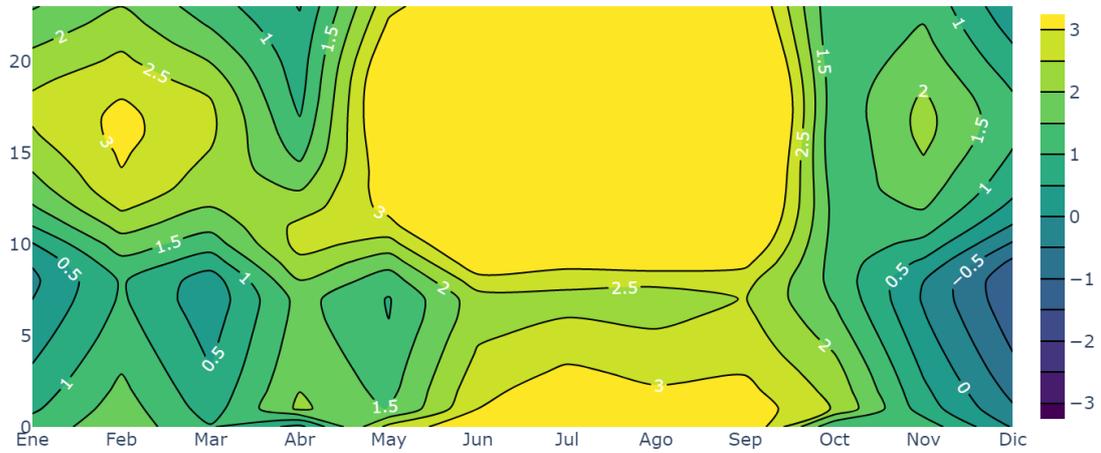


Figura 3.60: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo convencional en Cancún.

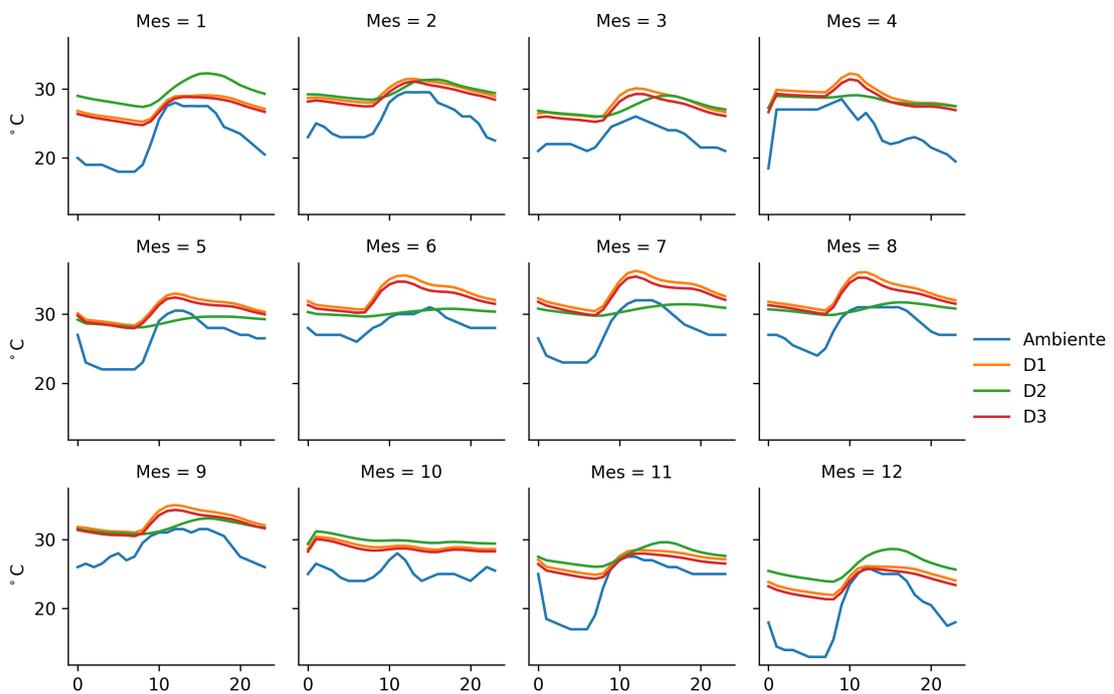


Figura 3.61: Temperatura ambiental y de los dormitorios del edificio con techo verde en Cancún.

enero, marzo, noviembre existe la sensación de confort. En el mes de diciembre esta sensación de confort térmico se experimenta durante gran parte del día (Figura 3.62). En el D2 el techo verde logra reducir la sensación de calor que se presentaba durante

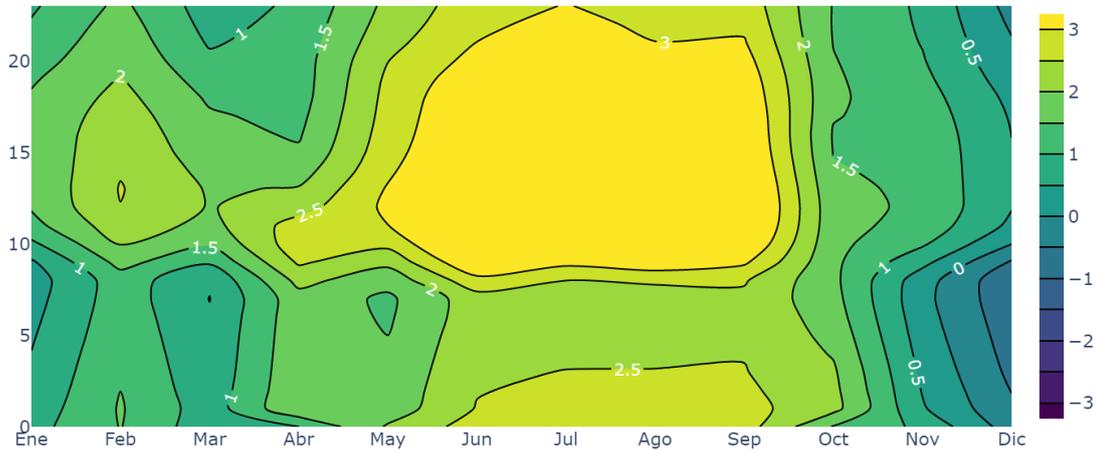


Figura 3.62: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 1 con techo verde en Cancún.

todo el año con el techo convencional. El techo verde logra reducir la sensación caliente que se presentaba con el techo convencional entre los meses de mayo y septiembre, esta sensación solamente se presenta entre las 14 horas y 19 horas del mes de septiembre (Figura 3.7). Sin embargo, el techo verde no es suficiente para alcanzar una sensación de confort térmico entre los meses de mayo y septiembre. El techo verde logra reducir la sensación de calor en el D3 en Cancún, la sensación de térmica de confort pasa de caliente a cálido en las primeras horas del día de los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Este fenómeno también ocurre en febrero y mayo por las tardes (Figura 3.8). Sin embargo, el techo verde no logra alcanzar una sensación de confort térmico por las tardes entre los meses de mayo y septiembre. Debido a que el techo verde es insuficiente para alcanzar un estado de confort térmico en los tres dormitorios, se simula el uso de aire acondicionado con el techo convencional y el techo verde. El techo verde logra reducir el consumo de energía debido al uso de aire acondicionado en los tres dormitorios, la reducción anual en enfriamiento para el D1, D2 y D3 es de 0.0 %, 34.5 % y 29.1 %. Mientras que, para la reducción en el consumo de energía para la calefacción para el D1, D2 y D3 es de -42.6 %, 74.5 % y 30.7 % (Tabla 3.6). Con esta reducción del consumo de energía por enfriamiento se evitan emitir 112.7 kg, 668.1 kg y 547.5 kg de CO₂e anuales en los dormitorios D1, D2 y D3, respectivamente (Tabla 3.1).

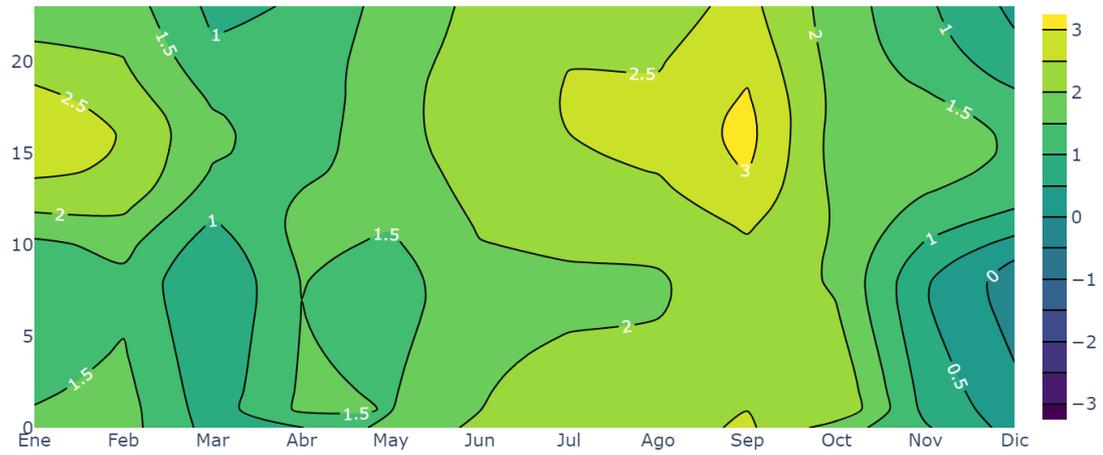


Figura 3.63: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 2 con techo verde en Cancún.

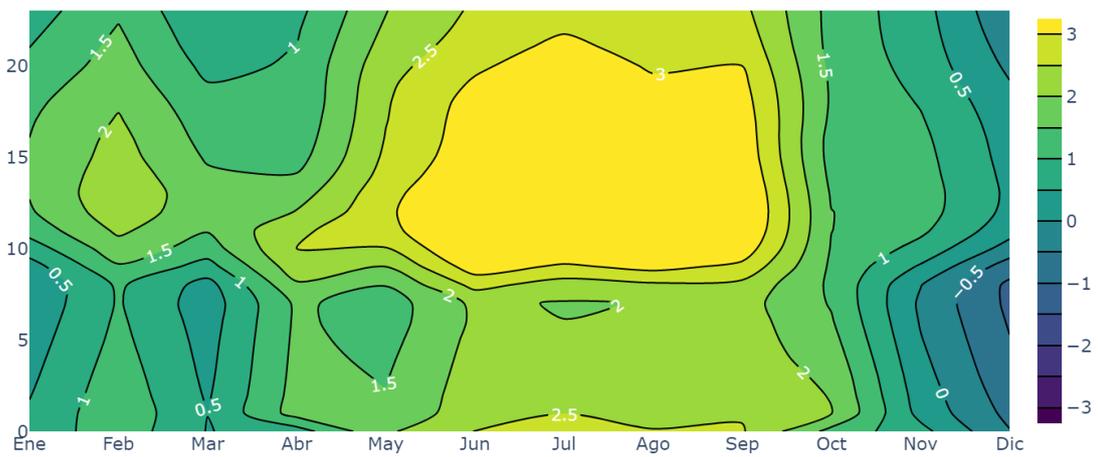


Figura 3.64: Sensación térmica según el PMV en el dormitorio 3 con techo verde en Cancún.

Tabla 3.6: Consumo de energía por climatización en Cancún.

Mes	Calefacción D1 (kWh)		Enfriamiento D1 (kWh)		Calefacción D2 (kWh)		Enfriamiento D2 (kWh)		Calefacción D3 (kWh)		Enfriamiento D3 (kWh)	
	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde	Techo convencional	Techo verde
Ene	2.7	3.5	159.9	148.2	2.0	0.7	292.6	223.7	8.1	6.4	206.0	146.9
Feb	0.2	0.3	181.6	167.0	0.0	0.0	271.9	192.3	1.6	1.0	230.4	164.5
Mar	0.0	0.1	224.9	206.2	0.0	0.0	306.5	196.2	1.2	0.5	293.3	202.4
Abr	0.0	0.0	274.7	252.0	0.1	0.0	337.3	205.0	0.5	0.0	365.2	257.1
May	0.0	0.0	337.3	308.7	0.0	0.0	416.8	245.8	0.0	0.0	461.3	321.9
Jun	0.0	0.0	344.7	319.7	0.0	0.0	406.1	251.3	0.0	0.0	462.2	335.9
Jul	0.0	0.0	402.6	366.1	0.0	0.0	517.2	298.7	0.0	0.0	569.6	392.5
Ago	0.0	0.0	368.7	339.4	0.0	0.0	466.8	283.3	0.0	0.0	507.2	359.7
Sep	0.0	0.0	313.7	287.9	0.0	0.0	445.3	292.9	0.0	0.0	433.8	310.2
Oct	0.0	0.0	263.2	243.0	0.0	0.0	408.3	285.4	0.0	0.0	360.2	259.0
Nov	0.1	0.2	184.7	170.3	0.0	0.0	295.6	220.2	1.1	0.6	230.5	167.4
Dec	1.4	2.0	164.2	152.6	0.7	0.0	285.8	219.6	5.8	4.3	206.5	150.2
Anual	4.3	6.2	3220.2	2961.2	2.8	0.7	4450.2	2914.4	18.4	12.8	4326.2	3067.7
Reducción anual (%)	-42.6		8.0		74.5		34.5		30.7		29.1	
Reducción anual de CO ₂ e (kg)	-0.8		112.7		0.9		668.1		2.5		547.5	

4

Conclusiones

En este trabajo se modeló y simuló el comportamiento térmico, de una vivienda con dos tipos de techos, convencional y verde. Para determinar el efecto térmico que tiene la implementación del techo verde en la vivienda sobre la temperatura interior y confort térmico se simuló la vivienda sin el uso del aire acondicionado. Para después, determinar tanto la disminución del consumo de energía y emisiones de CO₂e debido al uso del techo verde en la vivienda con un sistema de climatización. Las condiciones climáticas que se consideraron para este estudio corresponden a Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Tampico, Guanajuato, Querétaro, Pachuca y Cancún.

El sistema de información utilizado fue de gran importancia desde la información de entrada para EnergyPlus, para la simulación de los diferentes casos estudiados, el almacenamiento de la información una actividad importante para la preservación de datos, el procesamiento de la información para la transformación de datos para realizar el análisis del efecto térmico que tiene el techo verde en los dormitorios y la salida de información para obtener la información procesada tanto en tablas y como en figuras para su interpretación, presentación o facilitar a un usuario el acceso a ella.

El techo verde logra reducir la temperatura del aire en los tres dormitorios en las ciudades estudiadas, el dormitorio 1 tiene la menor reducción de temperatura ya que se encuentra en la planta baja. El dormitorio 2 presenta la mayor reducción de temperatura debido al uso del techo verde. Este dormitorio se encuentra en el primer piso, tiene dos superficies expuestas al ambiente y su fachada principal tiene una orientación hacia el sur. En Mexicali se tiene la mayor reducción de temperatura en el dormitorio 2 con un máximo de 10.7 °C.

El techo verde incrementa el consumo de energía por uso de calefacción en el dormitorio 1, mientras que logra reducir este consumo en los dos dormitorios restantes en las ciudades estudiadas. La reducción máxima en el consumo de energía por calefacción se presenta en el dormitorio 2 en la ciudad de Monterrey con una disminución de 137.0 kWh anuales. En Pachuca el techo verde reduce un máximo 5.5 % el consumo de calefacción en el dormitorio 3, este dormitorio se encuentra en el primer piso con una orientación hacia el norte.

El techo verde reduce el consumo de energía por enfriamiento en los 3 dormitorios de la vivienda en las ciudades estudiadas. La mayor reducción en el consumo de energía por enfriamiento se presenta en el dormitorio 2 en la ciudad de Hermosillo, ésta reducción fue de 2172.3 kWh anuales. Con el uso del techo verde y con un sis-

tema de acondicionamiento de aire se reduce un 46 % el consumo de energía anual en el dormitorio 2 en Mexicali, evitando 908.5 kg CO₂e de emisiones anuales hacia la atmósfera.

El techo verde en la ciudad de Pachuca reduce la temperatura, pero esto no ayuda a alcanzar un confort térmico en los dormitorios ya que en esta ciudad se tiene un problema de frío. En Guanajuato y Querétaro el techo verde logra reducir la temperatura de los dormitorios para alcanzar un estado de confort térmico durante gran parte del año evitando así el uso de un sistema de aire acondicionado. Por lo tanto, la implementación de un techo verde ayuda a reducir la temperatura interior de la vivienda, alcanzar confort térmico, disminuye el consumo de energía debido al uso de un sistema de climatización y evita las emisiones de contaminantes hacia la atmósfera.

Referencias

- Ahmed, A., Ge, T., Peng, J., Yan, W.-C., Tee, B. T., & You, S. (2022). Assessment of the renewable energy generation towards net-zero energy buildings: A review. *Energy and Buildings*, *256*, 111755.
- Ali, H., Hayat, N., Farukh, F., Imran, S., Kamran, M. S., & Ali, H. M. (2017). Key design features of multi-vacuum glazing for windows: A review. *Thermal Science*, *21*(6 Part B), 2673–2687.
- Anwar, M. W., Ali, Z., Javed, A., Din, E. U., & Sajid, M. (2021). Analysis of the effect of passive measures on the energy consumption and zero-energy prospects of residential buildings in pakistan. , *14*(4), 1325–1342.
- Ávila-Hernández, A., Simá, E., Xamán, J., Hernández-Pérez, I., Téllez-Velázquez, E., & Chagolla-Aranda, M. (2020). Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for mexico. *Energy and Buildings*, *209*, 109709.
- Bakhtiari, H., Akander, J., Cehlin, M., & Hayati, A. (2020). On the performance of night ventilation in a historic office building in nordic climate. *Energies*, *13*(16), 4159.
- Battista, G., Vollaro, E. d. L., & Vollaro, R. d. L. (2021). How cool pavements and green roof affect building energy performances. *Heat Transfer Engineering*, 1–15.
- Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones-the state of art. *Energy and Buildings*, *198*, 467–490.
- Bojić, M., Johannes, K., & Kuznik, F. (2014). Optimizing energy and environmental performance of passive trombe wall. *Energy and Buildings*, *70*, 279–286.
- Brucker Juricic, B., Krstić, H., & Čulo, K. (2021). Theoretical analysis and comparison of the thermal performance, construction costs, and maintenance complexity between a conventional and an intensive green roof. *Journal of Engineering*, *2021*.
- Cannavale, A., Martellotta, F., Fiorito, F., & Ayr, U. (2020). The challenge for building integration of highly transparent photovoltaics and photoelectrochromic devices. *Energies*, *13*(8), 1929.
- climate.onebuilding.org*. (n.d.). Retrieved 2022-05-16, from <https://climate.onebuilding.org/>
- Cook-Patton, S. C., & Bauerle, T. L. (2012). Potential benefits of plant diversity on vegetated roofs: a literature review. *Journal of environmental management*, *106*, 85–92.
- D’Agostino, D., Tzeiranaki, S. T., Zangheri, P., & Bertoldi, P. (2021). Assessing

- nearly zero energy buildings (nzebs) development in europe. *Energy Strategy Reviews*, 36, 100680.
- Deardorff, J. W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 83(C4), 1889–1903.
- Elahi, S. H., & Farhani, S. (2021). Increasing evaporative cooler efficiency by controlling water pump run and off times. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 127, 105525.
- Fanger, P. O., et al. (1970). Thermal comfort. analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering..*
- Fassman-Beck, E., Voyde, E., Simcock, R., & Hong, Y. S. (2013). 4 living roofs in 3 locations: Does configuration affect runoff mitigation? *Journal of Hydrology*, 490, 11–20.
- Förster, K., Westerholt, D., Kraft, P., & Lösken, G. (2021). Unprecedented retention capabilities of extensive green roofs new design approaches and an open source model. *Frontiers in Water*, 3, 122. Retrieved 2021-11-13, from <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/frwa.2021.689679> doi: 10.3389/frwa.2021.689679
- Frankenstein, S., & Koenig, G. (2004). *Fasst vegetation models* (Tech. Rep.).
- Garlisi, C., Trepici, E., Li, X., Al Sakkaf, R., Al-Ali, K., Nogueira, R. P., ... Palmisano, G. (2020). Multilayer thin film structures for multifunctional glass: Self-cleaning, antireflective and energy-saving properties. *Applied Energy*, 264, 114697.
- Hsieh, C.-M., Li, J.-J., Zhang, L., & Schwegler, B. (2018). Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy and Buildings*, 159, 382–397.
- Hu, Z., He, W., Ji, J., & Zhang, S. (2017). A review on the application of trombe wall system in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 976–987.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. resúmenes, preguntas frecuentes y recuadros multicapítulos. contribución del grupo de trabajo ii al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático* (Tech. Rep.). Ginebra (Suiza): Author. (Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds))
- IPCC. (2022). *Climate change 2022: Mitigation of climate change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Kalnæs, S. E., & Jelle, B. P. (2015). Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities. *Energy and Buildings*, 94, 150–176.
- Khalifa, A. (2017). Effect of roof pond on the energy and exergy performance of a single space building. *Journal of Thermal Engineering*, 3(3), 1275–1293.
- Kuhn, T. E. (2017). State of the art of advanced solar control devices for buildings.

- Solar Energy*, 154, 112–133.
- Kumar, K., Saboor, S., Kumar, V., Kim, K.-H., & TP, A. B. (2018). Experimental and theoretical studies of various solar control window glasses for the reduction of cooling and heating loads in buildings across different climatic regions. *Energy and Buildings*, 173, 326–336.
- Lee, J. H., Jeong, J., & Chae, Y. T. (2020). Optimal control parameter for electrochromic glazing operation in commercial buildings under different climatic conditions. *Applied Energy*, 260, 114338.
- Lei, K.-T., Tang, J.-S., & Chen, P.-H. (2019). Numerical simulation and experiments with green roofs for increasing indoor thermal comfort. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 42(4), 346–356.
- Li, S., Zhu, N., Hu, P., Lei, F., & Deng, R. (2019). Numerical study on thermal performance of pcm trombe wall. *Energy procedia*, 158, 2441–2447.
- Liang, R., Liu, D., Sun, Y., Luo, X., Grant, D., Walker, G., & Wu, Y. (2019). Investigation of mg-y coated gasochromic smart windows for building applications. In *Building simulation* (Vol. 12, pp. 99–112).
- Lin, P., Gou, Z., Lau, S. S.-Y., & Qin, H. (2017). The impact of urban design descriptors on outdoor thermal environment: A literature review. *Energies*, 10(12), 2151.
- Liu, C., Georgiou, F., & Hornikx, M. (2021). Characterization of the acoustic impedance of in-situ vegetated roofs. *Applied Acoustics*, 171, 107514.
- Maiolo, M., Pirouz, B., Bruno, R., Palermo, S. A., Arcuri, N., & Piro, P. (2020). The role of the extensive green roofs on decreasing building energy consumption in the mediterranean climate. *Sustainability*, 12(1), 359.
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 863–871.
- Nakielska, M., & Pawłowski, K. (2017). Increasing natural ventilation using solar chimney. In *E3s web of conferences* (Vol. 14, p. 01051).
- Nan, X., Yan, H., Wu, R., Shi, Y., & Bao, Z. (2020). Assessing the thermal performance of living wall systems in wet and cold climates during the winter. *Energy and Buildings*, 208, 109680.
- Nikolic, D., Djordjevic, S., Skerlic, J., & Radulovic, J. (2020). Energy analyses of serbian buildings with horizontal overhangs: A case study. *Energies*, 13(17), 4577.
- Nocente, A., & Grynning, S. (2020). Thermal mass and the effects on heating and cooling demands—an experimental study of an exposed concrete floor. *E3S Web of Conferences*.
- Noor, S., Ashraf, H., Sultan, M., & Khan, Z. M. (2020). Evaporative cooling options for building air-conditioning: A comprehensive study for climatic conditions of multan (pakistan). *Energies*, 13(12), 3061.
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van Den Dobbelen, A. (2015). The impact of greening systems on building energy performance: A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 610–623.
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (n.d.-a). *Diccionario de la lengua española*. (23.^a ed., [versión 23.6 en línea]. <https://dle.rae.es/barlovento> [2023-06-08])
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA. (n.d.-b). *Diccionario de la lengua española*. (23.^a

- ed., [versión 23.6 en línea]. <https://dle.rae.es/sotavento> [2023-06-08])
- SEMARNAT. (2023). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2022*. (Consultado: 2023-03-07)
- Sendra-Arranz, R., Oquendo, V., Olivieri, L., Olivieri, F., Bedoya, C., & Gutiérrez, A. (2020). Monitorization and statistical analysis of south and west green walls in a retrofitted building in madrid. *Building and Environment*, *183*, 107049.
- Shafiqh, P., Asadi, I., & Mahyuddin, N. B. (2018). Concrete as a thermal mass material for building applications-a review. *Journal of Building Engineering*, *19*, 14–25.
- Shafique, M., Kim, R., & Rafiq, M. (2018). Green roof benefits, opportunities and challenges—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *90*, 757–773.
- Sherif, A., El-Zafarany, A., & Arafa, R. (2012). External perforated window solar screens: The effect of screen depth and perforation ratio on energy performance in extreme desert environments. *Energy and Buildings*, *52*, 1–10.
- Shirinbakhsh, M., & Harvey, L. D. (2021). Net-zero energy buildings: The influence of definition on greenhouse gas emissions. *Energy and Buildings*, *247*, 111118.
- Simá, E., Chagolla-Aranda, M., Huelsz, G., Tovar, R., & Alvarez, G. (2015). Tree and neighboring buildings shading effects on the thermal performance of a house in a warm sub-humid climate. *Energy and Buildings*, *8*(6), 711–723.
- Sofia, E., & Putra, N. (2020). Evaporative cooling innovations-a review. In *Aip conference proceedings* (Vol. 2255, p. 020036).
- Song, M., Niu, F., Mao, N., Hu, Y., & Deng, S. (2018). Review on building energy performance improvement using phase change materials. *Energy and Buildings*, *158*, 776–793.
- Spanaki, A., Tsoutsos, T., & Kolokotsa, D. (2011). On the selection and design of the proper roof pond variant for passive cooling purposes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *15*(8), 3523–3533.
- Speak, A., Rothwell, J., Lindley, S., & Smith, C. (2012). Urban particulate pollution reduction by four species of green roof vegetation in a uk city. *Atmospheric Environment*, *61*, 283–293.
- Stella, P., & Personne, E. (2021). Effects of conventional, extensive and semi-intensive green roofs on building conductive heat fluxes and surface temperatures in winter in paris. *Building and Environment*, *205*, 108202.
- Susca, T. (2019). Green roofs to reduce building energy use? a review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate. *Building and environment*, *162*, 106273.
- Velasco-Gómez, E., Tejero-González, A., Jorge-Rico, J., & Rey-Martínez, F. J. (2020). Experimental investigation of the potential of a new fabric-based evaporative cooling pad. *Sustainability*, *12*(17), 7070.
- Verbeke, S., & Audenaert, A. (2018). Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. *Renewable and sustainable energy reviews*, *82*, 2300–2318.
- Widiastuti, R., Zaini, J., & Caesarendra, W. (2020). Field measurement on the model of green facade systems and its effect to building indoor thermal comfort. *Measurement*, *166*, 108212.

- Wong, N. H., Tan, A. Y. K., Tan, P. Y., & Wong, N. C. (2009). Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and buildings*, *41*(12), 1401–1408.
- Xamán, J., Rodríguez-Ake, A., Zavala-Guillén, I., Hernández-Pérez, I., Arce, J., & Saucedo, D. (2020). Thermal performance analysis of a roof with a pcm-layer under mexican weather conditions. *Renewable energy*, *149*, 773–785.
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in chicago. *Atmospheric environment*, *42*(31), 7266–7273.
- Yao, J., & Zhu, N. (2012). Evaluation of indoor thermal environmental, energy and daylighting performance of thermotropic windows. *Building and Environment*, *49*, 283–290.
- Zhang, S., Lin, Z., Zhang, S., & Ge, D. (2021, August). Stormwater retention and detention performance of green roofs with different substrates: Observational data and hydrological simulations. *Journal of Environmental Management*, *291*. Retrieved 2021-11-13, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721007441> doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112682
- Zhou, Y., Wang, Z., Yang, C., Xu, L., & Chen, W. (2019). Influence of trombe wall on indoor thermal environment of a two-story building in rural northern china during summer. *Science and Technology for the Built Environment*, *25*(4), 438–449.
- Zhu, N., Li, S., Hu, P., Lei, F., & Deng, R. (2019). Numerical investigations on performance of phase change material trombe wall in building. *Energy*, *187*, 116057.