



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – PROCESOS Y USO EFICIENTE DE ENERGÍA

**RENDIMIENTO TÉRMICO DE TECHOS VERDES EXTENSIVOS CON EL USO
DE AIRE ACONDICIONADO**

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

PRESENTA:
JUAN ROBERTO ROBLEDO RODRÍGUEZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. SERGIO QUEZADA GARCÍA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE DE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Martín Del Campo Márquez Cecilia

Secretario: Dra. Escobedo Izquierdo M. Azucena

Vocal: Dr. Quezada García Sergio

1er Suplente: Dr. Polo Labarrios Marco Antonio

2do Suplente: M. en I. Sánchez Cifuentes Augusto

Lugar donde se realizó la tesis: CIUDAD UNIVERSITARIA, FACULTAD DE INGENIERÍA.

TUTOR DE TESIS:

DR. SERGIO QUEZADA GARCÍA

FIRMA

Agradecimientos y dedicatorias

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México la oportunidad de pertenecer a la Facultad de Ingeniería y poder tener la oportunidad de formarme como un profesionista primero en la Ingeniería Petrolera y ahora por la Maestría en Ingeniería en Energía.

Agradecerle a mi director de tesis Dr. Sergio Quezada García, por su valiosa dirección, el apoyo y la dedicación para la realización de este trabajo de tesis; y a mis maestros en el transcurso de estos dos años en los cuales adquirí nuevos conocimientos y habilidades que han sido la base y el soporte de este proyecto.

Dedico éste trabajo realizado con mucho esfuerzo a mi esposa Alicia, quien es un pilar en mi vida y la motivación de mi superación personal como profesionista; hago extensa esta dedicación a mis hijas: Noemí, Perla Nataly, Aline Montserrat y Ana Sofía, quienes son mi orgullo e inspiración para continuar adquiriendo nuevos conocimientos y poder así lograr compartirlos con las futuras generaciones.

Este trabajo de tesis también se lo dedico a mis padres: Natalia y Juan, quienes me apoyaron y motivaron en mis sueños por realizarme como persona y como profesionista.

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo comparar, por medio del modelado matemático y la simulación, el comportamiento térmico de dos edificaciones, una de ellas con techo convencional y la otra con techo verde. Para alcanzar el objetivo primero se realiza una revisión de los modelos matemáticos más representativos en la literatura de los techos verdes. Posteriormente se propone un modelo de transferencia de calor que pueda ser fácilmente aplicable a cualquier techo verde extensivo sin requerir de un número excesivo de parámetros. Para validar el modelo, se compara la temperatura de la capa verde con la temperatura de la planta a partir de los datos experimentales reportados en la literatura, donde el error máximo es inferior a los 3 K. El estudio se realiza aplicando el modelo matemático a un edificio de un solo piso, considerando las condiciones climáticas de diferentes estados de México, cada uno de ellos con condiciones climáticas diferentes. Primero se eligen las condiciones climáticas de: la Ciudad de México, que tiene un clima cálido subhúmedo; el estado de Yucatán, con un clima cálido subhúmedo y finalmente las condiciones climáticas del estado de Coahuila donde el clima es cálido y seco. Los resultados muestran que los techos verdes ayudan a reducir la amplitud de oscilación de la temperatura interna hasta 14 K, mientras que la temperatura interna máxima del edificio se puede reducir hasta en 12 K. En cuanto a los índices de rendimiento térmico se obtuvo que el valor de la resistencia térmica equivalente es el doble para el techo verde con respecto al techo convencional, mientras que el coeficiente de disminución equivalente disminuye hasta 58% y el factor de climatización fue menor hasta en 65% para el techo verde. Por otro lado, los resultados muestran que la implementación de techos verdes puede representar un ahorro de energía por refrigeración hasta de 85%. Esto debido a que proporcionan un importante efecto de refrigeración durante el verano o en regiones geográficas con clima cálido.

Contenido

Agradecimientos y dedicatorias	1
Resumen	2
Contenido	3
Nomenclatura.....	5
Letras griegas	8
Subíndices	9
Introducción.....	11
Objetivo general.....	13
Objetivos particulares.....	13
1. Techos Verdes	14
1.1 Composición y clasificación.....	14
1.2. Beneficios	17
1.2.1. Purificación del aire	17
1.2.2. Reducción de la escorrentía.....	18
1.2.3. Reducción del efecto de isla de calor urbano	18
1.2.4. Reducción del ruido acústico	19
1.2.5. Preservación de la biodiversidad.....	19
1.2.6. Ahorro de energía en el edificio.....	20
2. Modelos Matemáticos Desarrollados	22
2.1. Antecedentes	22
2.2. Modelos de balance de energía.....	24
2.2.1. Métodos para el cálculo de los flujos de calor	29
2.3 Modelos de balance de masa	35
3. Modelo Matemático Propuesto.....	40
3.1. Modelo de transferencia de calor para elementos envolventes.....	40
3.2. Balance de energía para el interior del edificio	43
3.3. Modelo de transferencia de calor para el techo verde.....	43
3.4. Sistema de aire acondicionado.....	47

3.5. Índices para la evaluación del rendimiento térmico	49
3.5.1. Resistencia térmica equivalente	49
3.5.2. Factor de disminución equivalente.....	50
3.5.3. Factor de climatización	50
3.6. Solución numérica	51
4. Validación del Modelo Matemático	53
5. Casos de Estudio.....	57
6. Resultados y discusión	61
6.1 Edificaciones sin aire acondicionado.....	61
6.1.1. Índices de rendimiento térmico	65
6.2. Edificaciones con aire acondicionado.....	68
6.2.1. Flujo másico de aire	73
7. Conclusiones.....	77
Referencias	79

Nomenclatura

A	área	m^2
A_{in}	amplitud de la temperatura de la superficie interior	K
A_{ex}	amplitud de la temperatura de la superficie externa	K
b	espesor de la capa verde	m
c	espesor de la capa de sustrato	m
C_f	coeficiente de transferencia de calor	adimensional
C_m	capilaridad del sustrato	m^{-1}
C_p	calor específico	$J\ kg^{-1}K^{-1}$
COP	coeficiente de desempeño térmico	adimensional
d	altura promedio de las plantas	m
D_{mT}	difusividad isobárica del agua relacionada con el gradiente de temperatura	$m^2\ K^{-1}\ s^{-1}$
$D_{l\psi}$	difusividad isobárica del agua líquida relacionada con el gradiente de potencial	$m\ s^{-1}$
D_{vT}	coeficiente de difusividad del vapor	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}\ K^{-1}$
$e_a - e_d$	déficit de presión de vapor	kPa
ET	rapidez de evapotranspiración	$mm\ h^{-1}$
f	factor de disminución equivalente	adimensional
f_{prom}	factor de disminución equivalente promedio	adimensional
f_c	factor de climatización	adimensional

$f_{c\ prom}$	factor de climatización promedio	adimensional
Gr	número de Grashof	adimensional
h	coeficiente convectivo de transferencia de calor	$W\ m^{-2}\ K^{-1}$
I	intensidad de la radiación	$W\ m^{-2}$
k	coeficiente de conductividad térmica	$W\ m^{-1}\ K^{-1}$
k_h	conductividad hidráulica	$m\ s^{-1}$
L	espesor de la canopy	m
L_c	longitud característica	m
\dot{m}	flujo másico de aire	$kg\ s^{-1}$
LAI	índice de área foliar	$m^2\ m^{-2}$
$M_{C_6H_{12}O_6}$	masa molar de la glucosa	$kg\ mol^{-1}$
Nu	número de Nusselt	adimensional
Pr	número de Prandtl	adimensional
q	flux de calor	$W\ m^{-2}$
q_{md}	flux medio de calor transferido a través del techo	$W\ m^{-2}$
q_{tf}	flux de calor transferido al interior del edificio	$W\ m^{-2}$
\dot{Q}	calor transferido al interior del edificio	W
\dot{Q}_c	calor removido por el aire acondicionado	W
R_{ep}	tasa de evaporación	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
R_{es}	agua evaporada de la capa de almacenamiento	$L\ m^{-2}\ s^{-1}$
R_{et}	tasa de evapotranspiración	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$

R_d	Agua drenada de la capa de almacenamiento	$L m^{-2} s^{-1}$
R_D	tasa de agua que se pierde por el drenaje	$L m^{-2} s^{-1}$
R_p	tasa de agua de entrada por precipitación	$L m^{-2} s^{-1}$
R_s	Agua filtrada de la capa de sustrato	$L m^{-2} s^{-1}$
R_{TE}	resistencia térmica equivalente	$K m^2 W^{-1}$
R_{tp}	tasa de transpiración	$kg m^{-2} s^{-1}$
Ra	numero de Rayleigh	adimensional
Re	número de Reynolds	adimensional
S_k	fuelle de calor en el interior del edificio	W
t	tiempo	s
t_{ac}	tiempo de operación del aire acondicionado	s
T	temperatura	K
T_R	diferencia entre la máxima y la mínima temperatura ambiente registradas en un día	K
T_{sky}	temperatura cielo	K
v	velocidad del viento	$m s^{-1}$
$v_{net,C_6H_{12}O_6}$	tasa neta de fotosíntesis en glucosa	$kg m^{-2} s^{-1}$
V	volumen	L
\dot{W}	potencia eléctrica	W
z	dirección de transferencia de calor	m

Letras griegas

α	absortividad	adimensional
ε	emisividad	adimensional
φ_{vap}	flujo de vapor	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
γ	constante psicrométrica	kPa K^{-1}
λ	calor latente de vaporización	J kg^{-1}
θ	humedad específica	kg kg^{-1}
ρ	densidad	kg m^{-3}
σ	constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$
σ_p	fracción de cobertura de plantas	adimensional
σ_s	fracción descubierta del sustrato	adimensional
ζ	fracción volumen	adimensional
ω	contenido volumétrico de agua	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
ψ	potencial de humedad en el suelo	m
Δ	pendiente de la curva de presión de vapor	kPa K^{-1}
$\Delta_r H_m^\theta$	entalpia estándar de reacción	J mol^{-1}

Subíndices

a	aire contenido en la canopy
$a-\infty$	del aire de la canopy al aire del ambiente
$a-s$	del aire al sustrato
c	canopy
cv	convección
em	emisión
ep	evaporación
et	evapotranspiración
g	capa verde
H	homogénea
i	especie i
j	especie j
lr	radiación de onda larga
lri	radiación de onda larga incidente
p	planta
$p-a$	de la planta al aire de la canopy
ps	fotosíntesis
ps,net	fotosíntesis neta
r	techo de soporte
rp	respiración
s	sustrato
s,ex	superficie externa
s,in	superficie interna

<i>sp</i>	almacenamiento en las plantas
<i>sr</i>	radiación de onda corta
<i>sri</i>	radiación de onda corta incidente
<i>ss</i>	almacenado por el sustrato
<i>tr</i>	transpiración de las plantas
<i>w</i>	agua
∞	aire ambiente

Introducción

A partir de los años 50, nuestro planeta comenzó a experimentar una rápida urbanización. Aunque esto ha aportado numerosos beneficios a la humanidad, no se pueden ignorar sus repercusiones negativas, como la pérdida de biodiversidad, el deterioro de los ecosistemas, la contaminación ambiental, el cambio climático y las amenazas que éste conlleva. Estos efectos negativos son causados por las pautas insostenibles de consumo y producción [1]. Algunas otras consecuencias ambientales atribuibles a las actividades humanas son: el agotamiento de los recursos naturales, la lluvia ácida, la contaminación del aire y el deterioro de la capa de ozono. Las prácticas sostenibles se han convertido en los principales medios para mitigar estos problemas [2].

Los techos verdes han sido propuestos como una práctica sostenible para mitigar los efectos adversos de la urbanización [3,4]. Por tanto pueden ser parte de las prácticas sostenibles debido a los múltiples beneficios ambientales que ofrecen, los cuales se mencionan más adelante.

La implementación de los techos verdes está limitada por la ausencia de una comprensión completa de su valor económico [5]. Carter and Keeler [6] realizan un análisis costo-beneficio encontrando que los techos verdes tienen un valor presente neto de entre 10% y 14% mayor que los techos convencionales, debido a que su costo inicial es de tres a seis veces mayor [2]. Sin embargo, estos resultados contrastan con los obtenidos por Clark et al. [7] que demuestran que al final de la vida útil del techo verde su valor presente es entre 20.3% y 25.2% inferior al valor presente del techo convencional a lo largo de 40 años.

Con los modelos matemáticos, disponibles en la actualidad, acoplados a sistemas de climatización se podría evaluar cuantitativamente el ahorro de energía y tener resultados diferentes en su rentabilidad económica. El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el rendimiento térmico de los techos verdes extensivos comparándolos con techos convencionales, para determinar el ahorro de energía por climatización debido a su implementación. En el capítulo 1 se da la definición de techo verde, se mencionan las principales capas que lo componen, y se da una clasificación con base en el espesor del medio de cultivo o sustrato. Posteriormente se enlistan los principales beneficios ambientales. En el capítulo 2, se hace una revisión de la literatura de los modelos matemáticos desarrollados más representativos de la transferencia de energía y masa en los últimos treinta años, para describir el comportamiento de los techos verdes. En el capítulo 3, se propone un modelo matemático de transferencia de calor basado en los modelos matemáticos analizados en el capítulo anterior, se hace un esfuerzo por reducir el número de variables y parámetros de entrada para que el modelo pueda ser aplicado con mayor facilidad por el usuario; posteriormente se extiende dicho modelo para considerar el sistema de aire acondicionado, al final del capítulo se introducen factores para la evaluación del rendimiento térmico. En el capítulo 4 se lleva a cabo la validación del modelo matemático propuesto utilizando datos publicados en la literatura. En el capítulo 5 se aplica el modelo matemático propuesto a un edificio considerando las condiciones climáticas de tres estados de la república mexicana (Ciudad de México, Yucatán y Coahuila). En el capítulo 6 se presentan los resultados de las simulaciones. En los últimos dos capítulos se realiza un resumen y una discusión del tema, donde se retoman los puntos de vista más importantes sobre los resultados obtenidos y finalmente se presentan las conclusiones.

Objetivo general

El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el rendimiento térmico de los techos verdes extensivos comparándolos con techos convencionales, para determinar el ahorro de energía por climatización debido a la implementación del techo verde.

Objetivos particulares

- Realizar una revisión de los modelos matemáticos de transferencia de calor y masa existentes en la literatura.
- Con base en los modelos revisados proponer un modelo que requiera del menor número de parámetros posibles para implementarlo y validarlo.
- Evaluar el desempeño térmico, de los techos verdes en comparación con techos convencionales, para diferentes regiones del país.
- Determinar el posible ahorro de energía por climatización.

1. Techos Verdes

En este capítulo se da la definición de techo verde, se mencionan las principales capas que lo componen, se presenta una clasificación con base en el espesor del medio de cultivo o sustrato, y se enlistan los principales beneficios ambientales

1.1 Composición y clasificación

Los techos verdes son una técnica de refrigeración pasiva que impide que la radiación solar llegue a la construcción. Están formados por una serie de capas que se instalan sobre una azotea convencional, como se muestra en la **Figura 1.1**. El sistema de capas comprende una membrana impermeable, un medio de cultivo y una capa de vegetación. La construcción entre el medio de cultivo y la capa impermeabilizante de la azotea del edificio varía pero normalmente incluye:

- Una capa barrera de raíz
- Una capa de drenaje
- Una capa de almacenamiento
- Sistema de irrigación cuando el sistema lo requiere

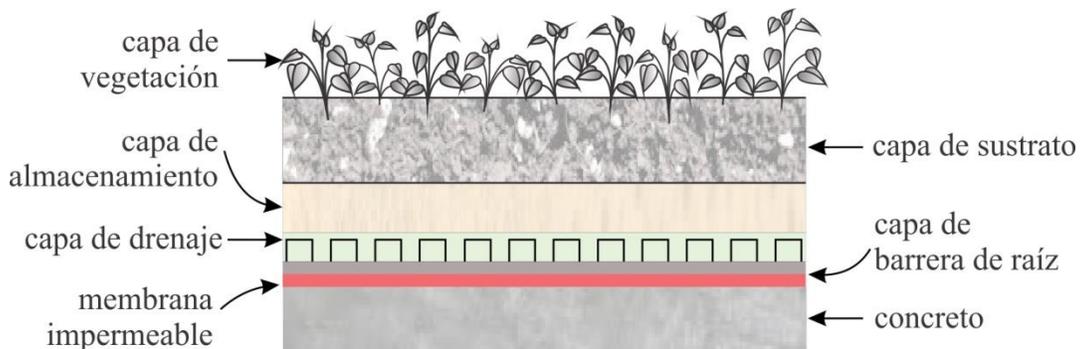


Figura 1.1. Representación esquemática de la composición de un techo verde.

Los techos verdes se clasifican de acuerdo con la profundidad del sustrato y el mantenimiento requerido, en extensivos e intensivos (ver **Figura 2.2**).

- Extensivos: el sustrato tiene una profundidad menor a 15 cm, por lo cual la variedad de plantas que puede albergar queda restringida a herbáceas, musgos y plantas crassas tipo sedum. Este tipo de techo verde requiere poco mantenimiento y puede llevarse a cabo en edificios existentes, debido a que no supone una carga adicional importante para la estructura de edificio.
- Intensivos: el sustrato tiene una profundidad mayor a los 15 cm, por lo que es posible tener auténticos jardines en los techos. Se pueden alojar en ellos una gran cantidad de plantas, incluyendo arbustos y árboles pequeños. Requieren de un mantenimiento regular, un sistema de irrigación y se planean desde la construcción del edificio debido a que la carga adicional de peso es grande.

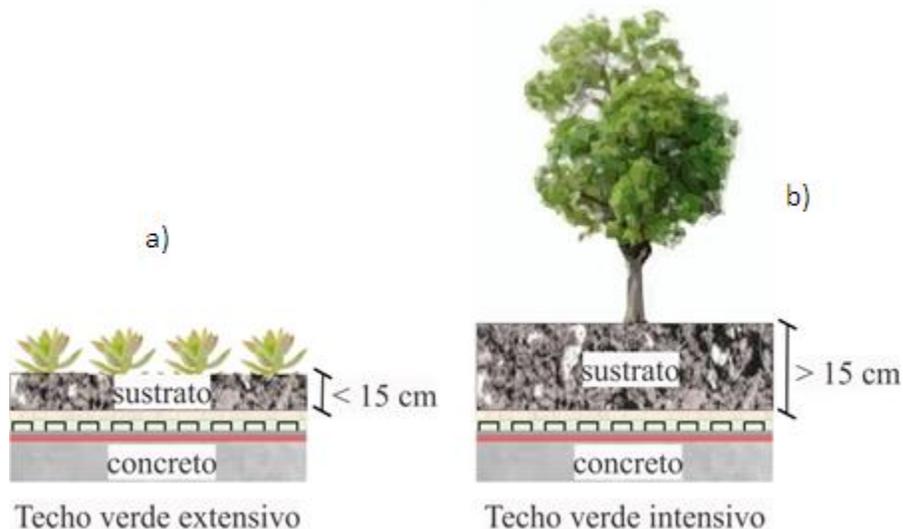


Figura 1.2. Techos verdes: a) extensivo, b) intensivo.

Debido a su fácil implementación y bajo mantenimiento, los techos verdes extensivos se han establecido durante las últimas décadas como una de las mejores opciones para integrar la vegetación en el entorno construido [8]. El éxito de estos sistemas implica tener una paleta de especies vegetales bien adaptada a condiciones extremas, especialmente en ambientes de sequía, el género sedum ha destacado por su tolerancia a las condiciones climáticas extremas y su uso se ha extendido por todo el mundo.

Teniendo en cuenta la cantidad de los edificios existentes, vale la pena llevar a cabo un análisis económico de la viabilidad de implementar techos verdes extensivos para la rehabilitación de estos edificios [9].

Durante los últimos años la popularidad de los techos verdes ha aumentado debido a que proporcionan una solución a los problemas ambientales que enfrentan las ciudades modernas. Además de mejorar la estética y la psicología urbana, también reducen las concentraciones de contaminantes [10,11], la escorrentía de lluvia [12–15], el ruido acústico [16] y la temperatura urbana mediante la mitigación del efecto de isla de calor urbano [17–19]. Otros beneficios de los techos verdes son la prolongación de la vida útil del techo [20,21], preservación de la biodiversidad [22–24] y ahorro de energía en el edificio [9,25–34].

1.2. Beneficios

1.2.1. Purificación del aire

Debido a la creciente necesidad por reducir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, la reducción de la huella de carbono de los edificios se ha convertido en una prioridad. Esto es evidente en los códigos y estándares de construcción de eficiencia energética, que son cada vez más estrictos, así como en programas voluntarios de certificación de desempeño como el programa LEED™ (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental, por sus siglas en inglés), el cual es un sistema de certificación con reconocimiento internacional para edificios sustentables, algunas características que deben de tener los edificios para obtener la certificación son: espacios con mejores condiciones para la salud, reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y ahorro energético.

Los techos verdes pueden ayudar a reducir las emisiones de carbono en las zonas urbanas, directa e indirectamente. Su impacto directo en el secuestro de carbono involucra a la vegetación y al medio de cultivo, que pueden capturar y almacenar los contaminantes. Su impacto indirecto incluye el efecto a largo plazo, de la reducción del consumo de energía de los edificios, lo que conduce a una reducción del consumo de combustibles fósiles [35].

Yang et al. [10] cuantifican la eliminación de la contaminación atmosférica, en Chicago, debida a los techos verdes. Los resultados muestran que con una superficie instalada de 19.8 ha de techos verdes es posible eliminar hasta 1,675 kg de contaminantes atmosféricos en un año. Los principales gases contaminantes eliminados son O₃, NO₂, PM₁₀ y SO₂.

Li et al. [36] estudian el efecto de los techos verdes en la concentración de CO₂, concluyendo que durante un día soleado, un techo verde puede reducir la concentración de CO₂ en la región cercana hasta en un 2%.

1.2.2. Reducción de la escorrentía

[Berndtsson et al. \[12\]](#) investigan la influencia de los techos verdes en la calidad del agua de escorrentía. Los resultados muestran que esta tecnología es un sumidero de nitrógeno nítrico y nitrógeno amoniacal, también neutralizan rápidamente las deposiciones ácidas.

[Mentens et al. \[13\]](#) concluyen que el reverdecimiento del 10% de los edificios en Bruselas con techos verdes extensivos daría lugar a una reducción de la escorrentía del 2.7% para la región y del 54% para los edificios individuales. Por su parte, [Speak et al. \[14\]](#) concluyen que la retención media de escorrentía para los techos verdes intensivos puede ser de hasta del 65.7%.

[Schultz et al. \[15\]](#) estudian el efecto del espesor de la capa de sustrato en la retención de escorrentía. Concluyen que el aumento del espesor de la capa de sustrato mejora la retención de escorrentía en 25% para precipitaciones de entre 5 mm y 10 mm. Mientras que para precipitaciones mayores a 35 mm la retención disminuye conforme aumenta el espesor de la capa de sustrato.

1.2.3. Reducción del efecto de isla de calor urbano

Las grandes superficies que ocupan las ciudades modernas, su estructura, sus materiales y la falta general de vegetación alteran las características climáticas de los espacios urbanos. Estas alteraciones afectan directamente el clima local de los espacios urbanos, causando un aumento significativo de la temperatura urbana, conocido como efecto de isla de calor. Esto tiene como consecuencia condiciones climáticas locales desagradables que incluso pueden poner en peligro la salud humana, especialmente para las ciudades con climas cálidos [\[18\]](#).

[Dong et al. \[19\]](#) cuantifican el efecto de enfriamiento de los techos verdes en la isla de Xiamen (China), donde se instalaron 54 ha de techos verdes entre 2015 y 2017. Los resultados muestran que la diferencia relativa entre la temperatura media de los techos verdes y la isla de Xiamen disminuyó en 0.91 K, lo que indica que los techos verdes pueden mitigar el efecto de isla de calor urbano. Se estimó que por cada 1,000 m² de aumento de la superficie del techo verde, la diferencia relativa entre la temperatura media del techo y su zona de amortiguación de enfriamiento característica disminuyó en 0.4 K.

1.2.4. Reducción del ruido acústico

Las molestias por el ruido del tráfico son un problema cada vez más importante en las regiones urbanizadas. [Renterghem and Botteldooren \[16\]](#) realizan una investigación numérica para determinar la influencia de los techos verdes en la carga de ruido debida al tráfico rodado a corta distancia. Concluyen que la reducción del ruido es directamente proporcional al tamaño de la superficie suficiente del techo verde y que al aumentar la velocidad del tráfico, para vehículos ligeros, el efecto del techo verde aumenta.

1.2.5. Preservación de la biodiversidad

Los techos verdes pueden proporcionar un hábitat para la biodiversidad, remediando la tierra perdida en la urbanización. Los microorganismos del suelo tienen un gran impacto en el ciclo de los nutrientes y, por lo tanto, en la diversidad de las plantas [\[22\]](#).

[Madre et al. \[23\]](#) realizan un estudio de edificios cubiertos por techos verdes en 115 sitios del norte de Francia. Encontraron que la riqueza y la abundancia de artrópodos son significativamente mayores en los techos que presentan una vegetación más compleja.

Los techos verdes pueden proporcionar un hábitat para los artrópodos. [Sánchez Domínguez et al. \[24\]](#) encontraron casi 400 especies diferentes de artrópodos en un grupo de 15 edificaciones con techo verde, ubicadas en Argentina.

1.2.6. Ahorro de energía en el edificio

A escala de los edificios, los techos verdes reducen el flujo de calor sensible debido al efecto de enfriamiento [\[25,26\]](#), disminuyendo así la demanda de calefacción y refrigeración de un edificio [\[27–29\]](#), y mejorando el confort térmico humano [\[30,31\]](#). Este efecto puede variar dependiendo de las condiciones climáticas [\[32,33\]](#), y del nivel de aislamiento, especialmente en casos de rehabilitación de edificios [\[9,34\]](#).

Mediante simulaciones dinámicas realizadas en el software TRNSYS, [Bevilacqua et al. \[17\]](#) demostraron que los techos verdes pueden reducir la demanda de energía de refrigeración, con un ahorro anual de hasta 34.9%. Adicionalmente encontraron que los techos verdes mejoran el confort térmico interior tanto en el verano como en el invierno. Esto último se debe a la resistencia térmica adicional proporcionada por la capa verde y el sustrato que contribuyen a limitar las pérdidas térmicas hacia el entorno exterior.

Los beneficios de los techos verdes muestran que juegan un papel importante en hacer que las ciudades sean sustentables y resistentes a los cambios climáticos. Por esta razón, son una solución ecológica a la jungla de concreto en las ciudades [\[37\]](#). Por lo tanto, muchos países están dando incentivos a los propietarios de casas para la implementación de esta tecnología [\[4\]](#) de la misma manera se están introduciendo políticas y reglamentos para promover la construcción de los techos verdes para proyectos de construcción [\[38\]](#).

Beneficios como el ahorro de energía en el edificio y la reducción del efecto de isla de calor urbano son ejemplos de cómo los techos verdes alteran el balance energético en el techo de

la construcción [39]. Del mismo modo, beneficios como la reducción de escorrentía demuestran que los techos verdes alteran también el balance de masa en el techo y el entorno. Por tal motivo, el diseño de techos verdes requiere un modelado numérico preciso para analizar plenamente los beneficios de esta tecnología [40]. En el siguiente capítulo se hace una revisión de los modelos matemáticos de transferencia de calor y masa más relevantes.

2. Modelos Matemáticos Desarrollados

Las regresiones simples derivadas de datos empíricos, las ecuaciones diferenciales basadas en los primeros principios de conservación de masa y energía así como la dinámica de fluidos proporcionan un marco analítico que permite la comprensión del comportamiento de los sistemas físicos. Estos conocimientos pueden ayudar a la toma de decisiones de diseño que tienen un impacto real en la seguridad, el costo y el rendimiento de los automóviles, redes eléctricas, plantas de generación de electricidad y la eficiencia energética de las edificaciones en los que vivimos y trabajamos.

En el presente capítulo se realiza una revisión de los modelos matemáticos, de transferencia de energía y masa desarrollados para describir el comportamiento de los techos verdes, más representativos en la literatura de los techos verdes.

2.1. Antecedentes

Como resultado del aislamiento proporcionado por el sustrato, la sombra de la canopy y el enfriamiento proporcionado por la transpiración de las plantas, así como por la evaporación del agua contenida en el sustrato, los techos verdes pueden reducir la magnitud del flujo de calor a través de la envoltura del edificio[41], como se muestra en la **Figura 2.1**.

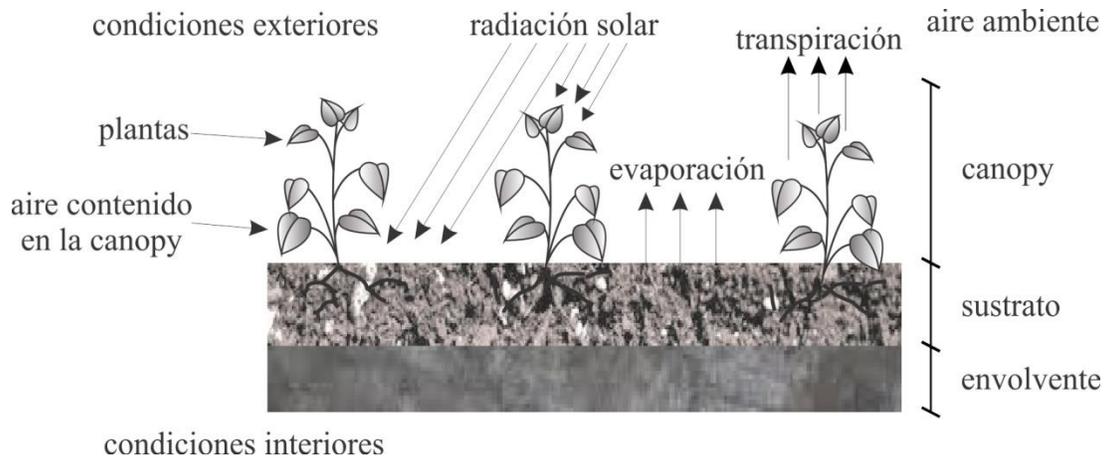


Figura 2.1. Sección transversal esquemática de un techo verde.

En los primeros esfuerzos en el modelado de las implicaciones energéticas de los techos verdes, no se tomaban en cuenta los factores anteriores debido a que los representaban como una simple capa resistiva cuya conductividad térmica era esencialmente constante [42]. Por lo tanto, los modelos obtenidos eran aplicables únicamente al caso de estudio.

En los últimos años se han desarrollado modelos matemáticos sofisticados de balance de energía y masa. Dos de los modelos matemáticos más representativos son los propuestos por Del Barrio [43] y Sailor [44], sin embargo, no toman en cuenta las funciones metabólicas de las plantas. El modelo propuesto por Heidarinejad and Esmaili [45] incluye efectos tales como la fotosíntesis y la respuesta que tienen las plantas a los cambios ambientales.

Los modelos que se están desarrollando actualmente también consideran el balance de masa [45–49]. Con el modelo propuesto por Tian et al. [47] además de poder obtener la distribución de temperatura, se puede obtener el contenido de humedad en el suelo. Algunos de los modelos matemáticos también toman en cuenta la porosidad de la canopy y el sustrato [50,51].

2.2. Modelos de balance de energía

Zhang et al. [52] proponen un modelo en estado estacionario para describir la transferencia de calor a través de la canopy y el sustrato:

$$q_{sr,c} + q_{lr,c} - q_{cv,c} - q_{tr} = 0 \quad \text{canopy} \quad (2.1)$$

$$q_{sr,s} + q_{lr,s} - q_{cv,s} - q_{ep} - q_{tf} = 0 \quad \text{sustrato} \quad (2.2)$$

donde q_{sr} es el calor neto ganado por radiación solar, q_{lr} es el calor ganado por radiación solar de onda larga, q_{cv} es el calor transferido por convección, q_{tr} es el calor perdido debido a la transpiración de las plantas, q_{ep} es el calor perdido debido a la evaporación del agua contenida en el sustrato, q_{tf} es el calor transferido al interior del edificio, mientras que los subíndices c y s hacen referencia a la canopy y al sustrato, respectivamente. Para calcular del calor transferido por convección, en este modelo, se emplea el índice de área foliar (leaf–area index (LAI)).

Del Barrio [43] presenta un modelo dinámico unidimensional. Mediante un análisis de sensibilidad encuentra un conjunto de variables relevantes, en el diseño de los techos verdes, tales como: LAI, la geometría de las plantas, densidad del suelo, así como su espesor y su contenido de humedad.

El modelo considera que la capa de sustrato es homogénea con propiedades termo–físicas constantes, lo cual implica que la humedad es constante. Así las ecuaciones que describen la transferencia de calor a través del elemento constructivo y la capa de sustrato son:

$$\left(\rho C_p\right)_r \frac{\partial T_r}{\partial t} = k_r \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} \quad (2.3)$$

donde T es la temperatura, ρ es la densidad, C_p es el calor específico, k es la conductividad térmica, t es el tiempo, z es la dirección en que se lleva a cabo la transferencia de calor y el subíndice r indica que se trata de las propiedades del elemento constructivo.

$$\left(\rho C_p\right)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(k_s + \lambda D_{vT}\right) \frac{\partial T_s}{\partial z} \right] \quad (2.4)$$

donde λ es el calor latente de vaporización, D_{vT} es el coeficiente no-isotérmico de difusividad del vapor y el subíndice s indica que se trata de las propiedades del sustrato.

Para la canopy se proponen tres ecuaciones, para determinar: la temperatura en la planta, la temperatura en el aire que se encuentra contenido en la canopy y la tercera es un balance de masa para determinar la humedad específica del aire, dichas ecuaciones se presentan a continuación:

$$\left(\rho C_p\right)_p dLAI \frac{dT_p}{dt} = q_{sr} + q_{lr} + q_{cv,p-a} + q_{tr} \quad (2.5)$$

$$\left(\rho C_p\right)_a L \frac{dT_a}{dt} = -q_{cv,p-a} + q_{cv,a-s} + q_{cv,a-\infty} \quad (2.6)$$

$$\rho_a L \frac{d\theta_a}{dt} = \phi_{vap,a-p} + \phi_{vap,a-s} + \phi_{vap,a-\infty} \quad (2.7)$$

donde LAI es el índice de área foliar (Leaf Area Index), d es la altura promedio de las plantas, T_p es la temperatura de la planta, L es el espesor de la canopy, T_a es la temperatura del aire contenido en la canopy, θ_a es la humedad específica del aire, $q_{cv,p-a}$ es el flux de calor por convección entre las plantas y el aire contenido en la canopy, $q_{cv,a-s}$ es el flux de calor por convección entre el aire contenido en la canopy y la superficie del sustrato, $q_{cv,a-\infty}$ es el flux de calor por convección entre el aire contenido en la canopy y el

aire ambiente, $\varphi_{vap,a-p}$ es el flujo de vapor entre el aire y la planta, $\varphi_{vap,a-s}$ es el flujo de vapor entre el aire y la superficie del sustrato y $\varphi_{vap,a-\infty}$ es el flujo de vapor entre el aire y el aire lejos de la canopy.

Kumar and Kaushik [53] utilizan el modelo de Del Barrio [43] con algunos cambios en el cálculo de las fuentes de calor. Mientras que Sailor [44] propone un modelo de transferencia de calor con una ecuación para la canopy, en la cual considera la fracción de cobertura de las plantas y otra ecuación para el sustrato:

$$q_c = \sigma_p (q_{sr} + q_{lr}) + q_{lr,s-c} + q_{cv,a-p} + q_{tr} \quad (2.8)$$

$$q_s = (1 - \sigma_p)(q_{sr} + q_{lr}) - q_{lr,s-c} + q_{cv,a-s} + q_{ep} + k_s \frac{\partial T_s}{\partial z} \quad (2.9)$$

donde q_c es el flux neto de calor en la canopy, σ_p es la fracción de cobertura de las plantas, $q_{lr,s-c}$ es el flux de calor transferido por radiación del sustrato a la canopy, $q_{cv,a-p}$ es el flux de calor transferido por convección del aire contenido en la canopy a la planta, q_s es el flux neto de calor en el sustrato, $q_{cv,a-s}$ es el flux de calor transferido por convección del aire contenido en la canopy al sustrato, q_{ep} es el flux de calor por evaporación mientras que el término $k_s(\partial T_s/\partial z)$ es el flux de calor transferido por conducción a través del sustrato, con este término es posible obtener la distribución de temperatura en el sustrato. Es importante mencionar que este modelo también considera el factor LAI en el cálculo de los flujos de calor. Este modelo se incluye en el software EnergyPlus, sin embargo, no toma en cuenta los procesos metabólicos de las plantas, tales como la fotosíntesis y la respiración, por nombrar algunos.

Ouldboukhitine et al. [54] toman este mismo modelo para el balance de energía y agregan un balance de masa, con lo cual las propiedades térmicas y la evapotranspiración son función del contenido de humedad en el sistema.

Por su parte Tabares–Velasco and Srebric [55] presentan y validan un modelo matemático de transferencia de calor y masa. Ayata et al. [56] proponen un modelo considerando los flujos de energía más relevantes:

$$q_{sr} - q_s - q_{et} - q_{cv} = 0 \quad (2.10)$$

donde q_{et} es el flux de calor debido a la evapotranspiración de las plantas y el sustrato. Este modelo no considera factores como la energía utilizada en actividades metabólicas por las plantas, así como el calor almacenado o liberado.

Feng et al. [57] se basan en la primera ley de la termodinámica para obtener la siguiente ecuación de balance de energía:

$$q_{sr} + q_{lr} + q_{cv} + q_{em} + q_{tr} + q_{ep} + q_{sp} + q_{ss} + q_{tf} + q_{ps} + q_{rp} = 0 \quad (2.11)$$

donde q_{em} es el flux de calor por emisión, q_{ep} es el flux de calor por evaporación, q_{sp} es el calor almacenado por las plantas, q_{ss} es el calor almacenado por el sustrato, q_{tf} es el flux de calor transferido al interior de la habitación, q_{ps} es la energía solar convertida por fotosíntesis y q_{rp} es el calor generado por la respiración de las plantas. Los flujos de calor involucrados en el balance se muestran en la **Figura 2.2**.

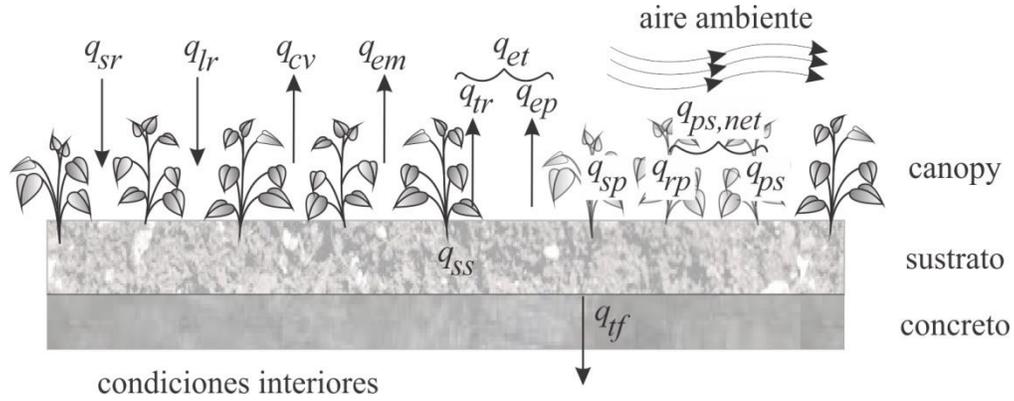


Figura 2.2. Intercambio de energía entre el techo verde y el ambiente.

La evapotranspiración del sistema compuesto por planta–sustrato está dada por la transpiración de las plantas y la evaporación del agua contenida en el sustrato, por lo tanto, el calor perdido por evapotranspiración está dado por:

$$q_{et} = q_{tr} + q_{ep} \quad (2.12)$$

Por otro lado el calor debido a la fotosíntesis neta, la cual involucra a la fotosíntesis y a la respiración de las plantas, está dado por:

$$q_{ps,net} = q_{ps} + q_{rp} \quad (2.13)$$

Como se puede ver en este modelo se comienzan a considerar algunos de los procesos metabólicos de las plantas como la fotosíntesis y la respiración. Sin embargo, el modelo no calcula de manera individual el calor debido a la fotosíntesis y el calor debido a la respiración de las plantas. Posteriormente [Heidarinejad and Esmaili \[45\]](#) modelan por primera vez el flujo de calor debido a la fotosíntesis.

[Quezada–García et al. \[50\]](#) consideran a la canopy y al sustrato como medios heterogéneos e introducen propiedades efectivas para ambas capas, dichas propiedades efectivas toman en cuenta la fracción volumen de los elementos que componen a cada capa:

$$k_H = k_i \zeta_i + k_j \zeta_j \quad (2.14)$$

$$(\rho C_p)_H = (\rho C_p)_i \zeta_i + (\rho C_p)_j \zeta_j \quad (2.15)$$

donde el subíndice H indica que se trata de una propiedad homogénea, es decir, de una propiedad efectiva para homogeneizar un medio heterogéneo, ζ es la fracción volumen del elemento y los subíndices i y j hacen referencia a los elementos que lo componen. Por lo tanto:

$$\zeta_i = \frac{V_i}{V_i + V_j} \quad (2.16)$$

$$\zeta_j = \frac{V_j}{V_i + V_j} \quad (2.17)$$

2.2.1. Métodos para el cálculo de los flujos de calor

A continuación se presentan algunos de los métodos para cuantificar los flujos de calor presentes en los techos verdes.

Radiación de onda corta

El flux de calor debido a la radiación de onda corta o radiación solar está dado por [58]:

$$q_{sr} = q_{sri} \alpha_{sr} \quad (2.18)$$

donde, q_{sri} es la radiación solar incidente y α_{sr} es la absorptividad de onda corta de la canopy. En algunos casos se emplea una expresión similar pero en términos de la reflectividad.

Radiación de onda larga

El flux de calor ganado por radiación de onda larga se puede calcular a partir de la siguiente correlación [59]:

$$q_{lr} = \alpha_{lr} \sigma (T_\infty)^4 [0.802 + 0.004(T_d - 273.15)] \quad (2.19)$$

donde α_{lr} es la absorptividad de radiación de onda larga de la canopy, σ es la constante de Stefan–Boltzmann, T_∞ es la temperatura ambiente y T_d es la temperatura de punto de rocío.

Calor emitido

El flux de calor perdido por emisión está dado por [58]:

$$q_{em} = \sigma \varepsilon_p T_p^4 \quad (2.20)$$

donde ε_p es la emisividad de las plantas y T_p es la temperatura de las plantas.

Radiación de onda larga y emisión de calor

Tabares–Velasco and Srebric [60] emplean la siguiente expresión para calcular el flux de calor debido a la radiación de onda larga y el calor emitido:

$$q_{lr} + q_{em} = \varepsilon_s \sigma (T_s^4 - T_{sky}^4) \quad (2.21)$$

donde T_{sky} es la temperatura cielo y existen diferentes métodos para estimarla. Evangelisti et al. [61] realizan una revisión sobre las correlaciones existentes para el cálculo de la temperatura cielo en función de diferentes condiciones climáticas.

Radiación total

Por su parte, Sailor [44] calcula el flux de calor debido a la radiación de onda corta, la radiación de onda larga y el calor emitido por medio de dos ecuaciones, una para la canopy y otra para el sustrato:

$$(q_{sr} + q_{lr} + q_{em})_c = \sigma_p \left[q_{sri} (1 - \sigma_p) + \varepsilon_p q_{lri} - \varepsilon_p T_p^4 \right] + \frac{\sigma_p \varepsilon_s \varepsilon_p \sigma}{\varepsilon_s + \varepsilon_p - \varepsilon_p \varepsilon_s} (T_s^4 - T_p^4) \quad (2.22)$$

$$(q_{sr} + q_{lr} + q_{em})_s = (1 - \sigma_p) \left[q_{sri} (1 - \sigma_s) + \varepsilon_s q_{lri} - \varepsilon_s T_s^4 \right] + \frac{\sigma_p \varepsilon_s \varepsilon_p \sigma}{\varepsilon_s + \varepsilon_p - \varepsilon_p \varepsilon_s} (T_s^4 - T_p^4) \quad (2.23)$$

donde σ_s es la fracción del sustrato que no es cubierta por la canopy, es decir $\sigma_s = (1 - \sigma_p)$, mientras que q_{lri} es la radiación de onda corta incidente, el segundo término del lado derecho de las Ecs, (22) y (23) considera el factor de forma del sustrato y las plantas.

Evapotranspiración

La suma del calor perdido por la transpiración de la planta y la evaporación del agua contenida en el sustrato se conoce como calor perdido por evapotranspiración y se calcula a partir de [57]:

$$q_{et} = q_{tr} + q_{ep} = \lambda R_{et} \quad (2.24)$$

donde R_{et} es la tasa de evapotranspiración, dada por la suma de la tasa de transpiración y la tasa de evaporación, es decir:

$$R_{et} = R_{tr} + R_{ep} \quad (2.25)$$

Calor neto convertido por la fotosíntesis

La energía convertida por la fotosíntesis y el calor generado por la respiración de las plantas se pueden calcular a partir del calor neto convertido por la fotosíntesis, dado por [57]:

$$q_{ps,net} = \Delta_r H_m^\theta \frac{v_{net,C_6H_{12}O_6}}{M_{C_6H_{12}O_6}} \quad (2.26)$$

donde $v_{net,C_6H_{12}O_6}$ es la tasa neta de fotosíntesis, $\Delta_r H_m^\theta$ es la entalpía estándar de reacción a 298 K y $M_{C_6H_{12}O_6}$ es la masa molar de la glucosa.

Fotosíntesis

El flux de calor debido sólo a la fotosíntesis se puede calcular a partir de [45]:

$$q_{ps} = \frac{\int_t^{t+dt} Idt}{\lambda \int_0^{24h} Idt} \frac{\Delta_r H_m^\theta}{R_{et}} \frac{v_{net, C_6H_{12}O_6}}{M_{C_6H_{12}O_6}} \int_0^{24h} q_{et} dt \quad (2.27)$$

donde I es la intensidad de la radiación.

Conducción

El calor transferido por conducción a través de las distintas capas se calcula a partir de expresiones similares a la [Ec. \(2.3\)](#) aplicadas a paredes compuestas.

Convección

Para el cálculo del flux de calor debido a la convección y a la evapotranspiración se han propuesto gran variedad de ecuaciones, a continuación se presentan algunas de ellas.

El calor transferido por convección del techo verde al medio ambiente se puede calcular a partir de la ley de enfriamiento de Newton:

$$q_{cv} = h(T_c - T_\infty) \quad (2.28)$$

donde T_∞ es la temperatura del aire ambiente.

[Ayata et. al. \[56\]](#) proponen calcular el calor transferido por convección modificando la ley de enfriamiento de Newton e introduciendo el parámetro LAI:

$$q_{cv} = LAIh(T_c - T_\infty) \quad (2.29)$$

El coeficiente convectivo de transferencia de calor es función del número de Nusselt que puede ser calculado, cuando se tiene flujo laminar de aire en el exterior, a partir de [\[56\]](#):

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = 0.664 Pr^{0.33} Re^{0.5} \quad (2.30)$$

donde L_c es una longitud característica h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, Pr es el número de Prandtl y Re es el número de Reynolds. Para convección libre,

El número de Nusselt se puede calcular en función del número de Grashof (Gr) por medio de [62]:

$$Nu=0.54Pr^{0.25}Gr^{0.25} \quad 10^4 < Gr < 10^7 \quad (2.31)$$

$$Nu=0.15Pr^{0.33}Gr^{0.33} \quad 10^7 < Gr < 10^{11} \quad (2.32)$$

Para los regímenes de flujo de convección forzada, de transición, y natural, [Tabares–Velasco and Srebric \[60\]](#) emplean las siguientes expresiones para determinar el Nu :

$$Nu=3+1.25(0.025Re^{0.8}) \quad Gr < 0.068Re^{2.2} \quad \text{Forzada} \quad (2.33)$$

$$Nu=2.7\left(\frac{Gr}{Re^{2.2}}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{45}{4}+0.0253\frac{15}{16}Re^{0.8}\right) \quad 0.068Re^{2.2} < Gr < 55.3Re^{\frac{5}{3}} \quad \text{Mixta} \quad (2.34)$$

$$Nu=0.15Ra^{\frac{1}{3}} \quad 55.3Re^{\frac{5}{3}} < Gr \quad \text{Natural} \quad (2.35)$$

donde Ra es el número de Rayleigh. También es posible calcular el coeficiente convectivo de transferencia de calor, cuando la convección forzada domina sobre la convección libre, a partir de la correlación de empírica de McAdams [63]:

$$h = 5.9 + 4.1v \frac{511 + 294}{511 + T_{\infty}} \quad (2.36)$$

donde v es la velocidad del viento. Por su parte, [Meng et al. \[64\]](#) proponen calcular el calor transferido por convección a partir de la siguiente correlación empírica:

$$q_{cv} = (5.7 + 3.8v)(T_p - T_{\infty}) \quad (2.37)$$

Mientras que [Sailor \[44\]](#) calcula el calor transferido por convección, en la canopy, modificando la ecuación [Deardorff \[65\]](#), incluyendo el LAI:

$$q_{cv} = 1.1LAI\rho_c(C_p)_a C_f v (T_p - T_a) \quad (2.38)$$

donde C_f es el coeficiente adimensional de transferencia de calor que considera ambos lados de la hoja.

Por su parte [Ayata et al. \[56\]](#) proponen, por medio de datos experimentales, dos correlaciones obtenidas de forma empírica para determinar el calor transferido por convección:

$$q_{cv} = \sigma_p LAI h \left(\frac{e^v}{(11\omega v)^2} \right) (T_p - T_\infty)^n \quad \text{con } n = 0 \text{ ó } 1 \text{ Forzada} \quad (2.39)$$

$$q_{cv} = \sigma_p LAI h \left(\frac{\omega}{v} e^{3\omega} \right) (T_p - T_\infty) \quad \text{Natural} \quad (2.40)$$

donde ω es el contenido volumétrico de agua.

Evapotranspiración

Uno de los factores más relevantes en el modelado de los techos verdes es la evapotranspiración, por lo tanto es deseable que los modelos matemáticos incluyan un modelo para la evapotranspiración. [Lazzarin et al. \[66\]](#) emplean un método empírico para estimar la evapotranspiración. Por otro lado, [Ayata et al. \[56\]](#) proponen medir la tasa de evapotranspiración directamente al medir la tasa de pérdida de agua. Sin embargo esto sólo es aplicable para techos verdes instalados y no funciona para la etapa de diseño.

El método de Penman–Monteith es utilizado para estimar la evapotranspiración potencial de los techos verdes [\[67\]](#):

$$ET = \frac{\Delta(q_{sr} - q_s) + \frac{900\gamma}{T_a} v(e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34v)} \quad (2.41)$$

donde ET es la rapidez de evapotranspiración, Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor saturado con la temperatura del aire, γ es la constante psicrométrica y el término

$e_a - e_d$ representa el déficit de presión de vapor. [Jahanfar et al. \[68\]](#) proponen un modelo basado en la ecuación de Penman–Monteith para predecir la tasa de evapotranspiración en los techos verdes. Una revisión más detallada sobre la evapotranspiración es realizada por [Cascone et al. \[69\]](#).

Aunque la mayoría de los estudios coinciden en considerar la evapotranspiración como uno de los principales factores que afectan el comportamiento de los techos verdes, sólo en algunos de ellos se evalúa experimentalmente la tasa de evapotranspiración [\[70\]](#).

Sólo algunos de los modelos anteriores toman en cuenta el balance de masa (e.g. [\[54,55\]](#)), sin embargo parte importante del calor que se transfiere es debido a la evapotranspiración. Adicionalmente las propiedades del sustrato cambian en función de la cantidad de agua contenida. [Ouldboukhitine and Belarbi \[71\]](#) realizan un estudio para correlacionar la conductividad térmica del sustrato con el contenido de agua.

2.3 Modelos de balance de masa

Además de alterar el balance de energía y las propiedades térmicas de los materiales el contenido de humedad, los techos verdes pueden sufrir estrés hídrico durante periodos prolongados de sequía. Por lo tanto, su salud depende de la humedad que pueda ser almacenada en el sustrato o bien en algunos casos se incluye una capa de almacenamiento. Se han dedicado algunos trabajos al estudio de la influencia del riego (e.g. [\[72,73\]](#)).

Muchos de los estudios actuales se realizan para determinar la cantidad de agua contenida en los techos verdes (e.g. [\[73–76\]](#)). En dichos estudios se ha comenzado a examinar el efecto del drenaje en el rendimiento del sistema hidrológico (e.g. [\[76,77\]](#)). Así mismo, se

están realizando esfuerzos por simular la humedad contenida en la capa de almacenamiento considerando factores como la evapotranspiración [75].

Uno de los beneficios de los techos verdes es la reducción de escorrentía, por lo tanto, algunos autores se han enfocado en estudiar el efecto que tiene la profundidad del sustrato en la escorrentía a partir de modelos hidrológicos (e.g. [34,74,78]). Locatelli et al. [74] presentan un modelo del desempeño hidrológico a largo plazo, este modelo incluye el almacenamiento superficial y subterráneo que representa la capacidad total de retención de agua pluvial. Por otra parte Castiglia Feitosa and Wilkinson [34] evalúan el efecto que tiene la profundidad del sustrato en la atenuación del caudal de aguas pluviales. Mientras que Soulis et al. [78] simulan el funcionamiento hidrológico de los techos verdes para diferentes profundidades de sustrato.

Ouldboukhitine et al. [54] mencionan que el balance de agua en el sustrato debe de considerar la cantidad de agua que entra por lluvia, el agua que sale por el drenaje y la cantidad de agua perdida por evapotranspiración, como se muestra en la **Figura 2.3**; considerando al sustrato como un medio poroso no deformable con propiedades uniformes, horizontalmente, el balance de agua está dado por:

$$C_m \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_h \frac{\partial \psi}{\partial z} + D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} - D_{l\psi} \right] \quad (2.40)$$

donde C_m es la capacidad capilar del sustrato, ψ es el potencial de humedad en el suelo, k_h es la conductividad hidráulica, D_{mT} es la difusividad isobárica del agua relacionada con el gradiente de temperatura y $D_{l\psi}$ es la difusividad isobárica del agua líquida relacionada con el gradiente de potencial. El flujo de agua que entra al sistema por lluvia y que sale por el drenaje y evapotranspiración es considerado en las condiciones de frontera. Es decir, el

término $\frac{\partial}{\partial z} \left(k_h \frac{\partial \psi}{\partial z} \right)$ describe el escurrimiento a través de la capa de sustrato y por lo tanto, la cantidad de agua que sale por el drenaje y que entra por lluvia; mientras que el término $\frac{\partial}{\partial z} \left(D_{mT} \frac{\partial T}{\partial z} \right)$ describe la evapotranspiración del sistema.

Un modelo similar para el sustrato es el empleado por [Heidarinejad and Esmaili \[45\]](#) dado por:

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k_h \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (2.41)$$

Este modelo no considera la evapotranspiración del sistema, sólo considera el escurrimiento de agua.

Un balance de materia más claro para el sustrato está dado por [\[46\]](#):

$$\rho_w \Delta z \frac{\partial \omega}{\partial t} = R_p - R_D - R_{et} \quad (2.42)$$

donde el subíndice w se refiere al agua, R_p es la tasa de agua ganada por precipitación y R_D es la tasa de agua que se pierde a través del drenaje como se muestra en la **Figure 3**.

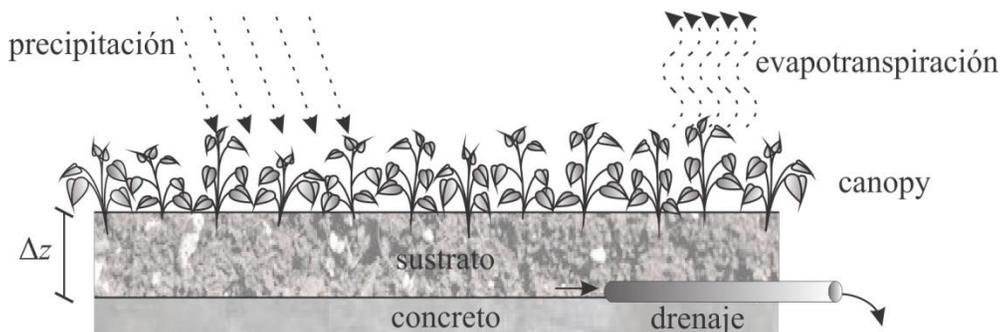


Figura 2.3. Representación esquemática del balance de agua en el sustrato.

Otros autores proponen modelos similares (e.g. [74,79]). Por su parte, [Qin et al. \[75\]](#) incluyen en su modelo una ecuación para determinar el contenido de agua en la capa de almacenamiento:

$$\frac{dV}{dt} = (R_s - R_d - R_{es}) A \quad (2.43)$$

donde V es el volumen de agua contenido en la capa de almacenamiento, R_s es la cantidad de agua filtrada por la capa de sustrato, R_d es la cantidad de agua drenada de la capa de almacenamiento, R_{es} es la cantidad de agua perdida por evaporación en la capa de almacenamiento y A es el área superficial del techo verde como se muestra en la **Figura 2.4**.

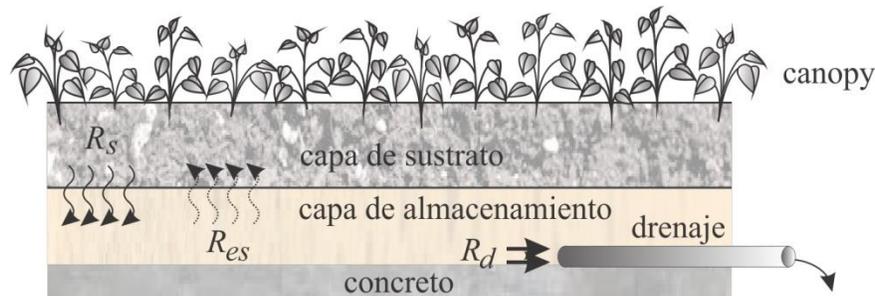


Figura 2.4. Representación esquemática del balance de agua para la capa de almacenamiento.

Los modelos actuales de transferencia de calor para los techos verdes son unidimensionales y la mayoría considera que la canopy y el sustrato son homogéneos. Así mismo la mayoría de los modelos considera que las plantas cubren en su totalidad el área del techo.

Todos los modelos incluyen el cálculo de calor debido a la radiación de onda corta, la radiación de onda larga, la conducción (en el sustrato y el elemento constructivo) y la convección entre la canopy y el aire ambiente. Pocos son los modelos que consideran los

procesos metabólicos de las plantas. Mientras que los modelos de masa consideran que el contenido de humedad en el sustrato es homogéneo tanto horizontal como verticalmente.

La falta de conocimientos precisos de las características térmicas y botánicas son una de las principales barreras en el modelado y la evaluación energética cuantitativa de los techos verdes [71]. Adicionalmente las propiedades del sustrato no son constantes, cambian en función de la humedad [80]. Por lo tanto, algunos investigadores están realizando esfuerzos para determinar las propiedades térmicas del sustrato en función de la humedad (e.g. [39]). Sin embargo, el sustrato empleado en los techos difiere de un caso a otro.

En los nuevos modelos matemáticos se deben tener en cuenta los esfuerzos que se han realizado hasta ahora, considerando los aportes más relevantes de algunos investigadores. Así será posible considerar que tanto la canopy como el sustrato son medios heterogéneos, que las plantas no cubren en su totalidad el área del techo, los procesos metabólicos de las plantas, así como la variación del contenido de humedad en el sustrato y en la capa de almacenamiento.

3. Modelo Matemático Propuesto

Los techos verdes parecen ser una solución atractiva para las construcciones sostenibles porque producen diferentes beneficios para el edificio y su entorno. Sin embargo, los modelos dinámicos para la simulación de superficies vegetadas requieren el conocimiento de varios parámetros, frecuentemente difíciles de medir, para estimar con exactitud la transferencia de calor con el entorno exterior [17]. Por tal razón en el presente capítulo se propone un modelo de transferencia de calor que pueda ser fácilmente aplicable a cualquier techo verde extensivo sin requerir de un número excesivo de parámetros. También se describen las capas que componen el techo verde extensivo y el balance energético del interior del edificio.

3.1. Modelo de transferencia de calor para elementos envolventes

El modelo matemático de transferencia de calor para los elementos constructivos convencionales considera la conducción unidimensional del calor a través del techo y las paredes. Se considera que estos elementos están constituidos por un único material uniforme y opaco, es decir, no se consideran las ventanas. Los flujos de calor en un techo convencional se muestran en la **Figura 3.1**.

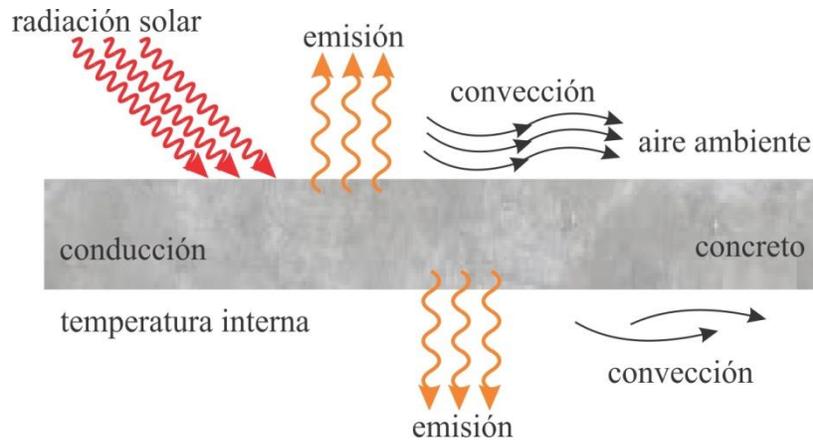


Figura 3.1. Flujos de calor en un techo convencional.

La transferencia de calor por conducción, a través de la envolvente del edificio, está dada por:

$$\rho C_p \frac{\partial T_r}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T_r}{\partial z^2} \quad (3.1)$$

La condición inicial está dada por:

$$T(t, z) = T_0(z) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (3.2)$$

La condición de frontera en el exterior del edificio ($z = 0$), está dada por:

$$-k \frac{dT}{dz} \Big|_{z=0} = q_{sr} - q_{em} - q_{cv} \quad (3.3)$$

Estos flujos de calor se calculan a partir de:

$$q_{sr} = \alpha q_{sri} \quad (3.4)$$

$$q_{em} = \varepsilon \sigma \left(T_r^4 \Big|_{z=0} - T_e^4 \right) \quad (3.5)$$

$$q_{cv} = h \left(T_r \Big|_{z=0} - T_\infty \right) \quad (3.6)$$

donde T_e es la temperatura de los alrededores. El coeficiente convectivo de transferencia de calor se calcula a partir del número adimensional de Nusselt:

$$\text{Nu} = \frac{hL_c}{k} \quad (3.7)$$

El número de Nusselt para paredes planas se puede calcular a partir de la correlación [81]:

$$\text{Nu} = \frac{0.3387 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}^{1/2}}{\left(1 + \left(\frac{0.0468}{\text{Pr}}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \quad (3.8)$$

donde Re es el número adimensional de Reynolds y Pr es el número adimensional de Prandtl, los cuales se calculan a partir de:

$$\text{Re} = \frac{\rho v L_c}{\mu} \quad (3.9)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (3.10)$$

donde μ es la viscosidad dinámica del aire.

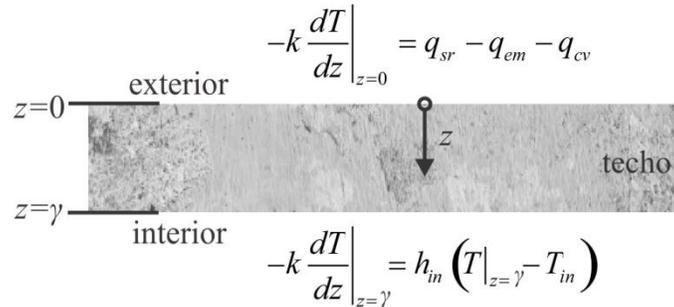


Figura 3.2. Condiciones de frontera para el interior y el exterior del edificio.

La condición de frontera para el interior del edificio es:

$$-k \frac{dT_r}{dz} \Big|_{z=\gamma} = h_{in} (T_r|_{z=\gamma} - T_{in}) \quad (3.11)$$

donde γ es el espesor de la envolvente, T_{in} es la temperatura del aire contenido en el interior del edificio y h_{in} es el coeficiente combinado de transferencia de calor en el interior

del edificio, este coeficiente incluye la convección y la radiación. Las condiciones de frontera para el exterior y el interior del edificio se ejemplifican en la **Figura 3.2**. Este modelo es utilizado para todas las envolventes del edificio.

3.2. Balance de energía para el interior del edificio

El cambio de la temperatura interior del edificio en función de tiempo está dado por:

$$(mC_p)_{in} \frac{dT_{in}}{dt} = \dot{Q} + \dot{m}(h_{\infty} - h_{in}) \quad (3.12)$$

donde m es la masa de aire contenida dentro del edificio, \dot{m} es el flujo másico de aire que entra al interior del edificio, h es la entalpía del aire y \dot{Q} es el calor total transferido al interior del edificio, el cual se puede calcular a partir de:

$$\dot{Q} = \sum h_{in} (T_i - T_{in}) A_i + \sum S_k - \dot{Q}_c \quad (3.13)$$

donde T_i y A_i son la temperatura y el área del elemento envolvente i , respectivamente.

Mientras que S_k es la fuente de calor k dentro del edificio, esta fuente puede ser debida a personas o aparatos eléctricos. Q_c es el calor removido por el efecto de enfriamiento del sistema de aire acondicionado. La condición inicial de la [Ec. \(3.12\)](#) es:

$$T_{in} = T_{in,0} \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (3.14)$$

3.3. Modelo de transferencia de calor para el techo verde

Un modelo conceptual de un techo verde se muestra en la **Figura 3.3**. En esta figura se muestran los flujos de calor en las diferentes capas que componen el sistema.

El calor transferido por conducción a través de la capa verde, formada por plantas y aire, está dada por una ecuación que considera las propiedades efectivas del sistema heterogéneo formado por una fase sólida y una gaseosa:

$$(\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (3.15)$$

donde T_g es la temperatura de la capa verde, $(\rho C_p)_g$ y k_g son las propiedades efectivas de la capa verde que se pueden obtener a partir de [82]:

$$(\rho C_p)_{ef} = (\rho C_p)_1(1-\zeta) + (\rho C_p)_2\zeta \quad (3.16)$$

$$k_{ef} = k_1(1-\zeta) + k_2\zeta \quad (3.17)$$

donde el subíndice ef hace referencia a una propiedad efectiva, las subíndices 1 y 2 se refieren al componente de la capa (planta y aire o tierra y agua) y ζ es la fracción volumen del componente 1, es decir:

$$\zeta = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (3.18)$$

El calor transferido por conducción a través de la capa de sustrato, formada por tierra y aire, está dado por:

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (3.19)$$

donde T_s es la temperatura del sustrato, $(\rho C_p)_s$ y k_s son las propiedades efectivas de la capa de sustrato y se pueden calcular de manera similar a las propiedades efectivas de la capa verde. Las Ecs. (3.18) y (3.19) toman en cuenta la porosidad de las capas. Se ha

demostrado, a través de experimentos y simulación numérica, que la conductividad térmica depende de la porosidad y las propiedades térmicas de los componentes minerales del suelo [83].

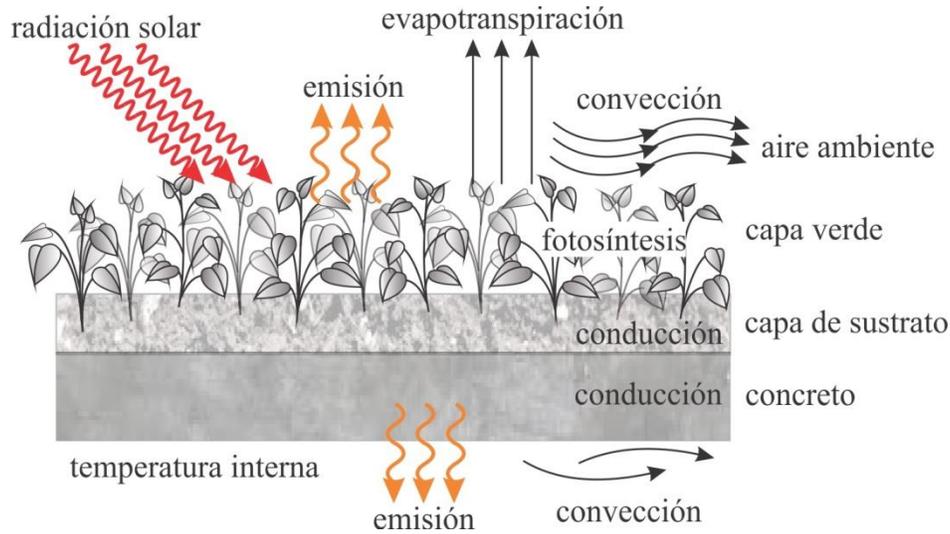


Figura 3.3. Modelo conceptual de un techo verde con los principales flujos de calor.

Las condiciones iniciales para las Ecs. (3.15) y (3.19) son:

$$T_g(0, z) = T_{g,0}(z) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (3.20)$$

$$T_s(0, z) = T_{s,0}(z) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (3.21)$$

Las Ecs. (3.15) y (3.19) están relacionadas a través de la siguiente condición de frontera:

$$T_s(t) = T_g(t) \quad \text{en} \quad z = b \quad (3.22)$$

donde b es el espesor de la capa verde.

Las Ecs. (3.19) y (3.1) están relacionadas a través de la siguiente condición de frontera:

$$T(t) = T_s(t) \quad \text{en} \quad z = b + c \quad (3.23)$$

donde c es el espesor de la capa de sustrato.

La condición de frontera para la Ec. (3.15) en el exterior del edificio ($z = 0$) es:

$$-k_g \left. \frac{dT_g}{dz} \right|_{z=0} = q_{sr} - q_{em,g} - q_{cv,g} - q_{et} - q_{ps} \quad (3.24)$$

donde q_{et} es flux de calor debido a la evapotranspiración y q_{ps} es el flux de calor neto debido a la fotosíntesis y la respiración de las plantas, este último se puede calcular a partir de la siguiente correlación [57]:

$$q_{ps} = \frac{6.5}{TC(1 + R_{ep}/R_{tp})} q_{et} \quad (3.25)$$

donde TC es el coeficiente de transpiración, R_{ep} es la tasa de evaporación y R_{tp} es la tasa de transpiración. En este estudio se considera que $R_{ep}/R_{tp} = 1$, con $TC = 20$.

El flux de calor debido a la evapotranspiración se puede determinar a partir de [57]:

$$q_{et} = \lambda R_{et} \quad (3.26)$$

La evapotranspiración es una combinación del fenómeno de la transpiración de agua por las plantas durante su crecimiento o retenida en su tejido vegetal y el fenómeno de la evaporación de la humedad del sustrato [70,84]. Estos fenómenos son función principalmente de la radiación solar que llega a la superficie del sustrato, ya que proporciona la energía necesaria.

La evapotranspiración se puede calcular empleando la ecuación de Hargreaves, que se basa en datos climáticos fácilmente disponibles [85]:

$$ET_0 = 0.0023 q_{sri} (T_\infty - 255.35) T_R^{0.5} \quad (3.27)$$

donde T_R es la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura ambiente registradas durante el día, es decir:

$$T_R = T_{\max} - T_{\min} \quad (3.28)$$

Entonces R_{et} está dado por:

$$R_{et} = e_f ET_0 \quad (3.29)$$

donde e_f es un factor de conversión igual a $5.218987 \times 10^{-7} \text{ kg día m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

El flux de calor por convección desde la capa verde hacia el ambiente se puede calcular a través de la correlación [64]:

$$q_{cv,g} = (5.7 + 3.8v)(T_g - T_\infty) \quad (3.30)$$

El flux de calor debido a la emisión desde la capa verde hacia el ambiente está dado por:

$$q_{em,g} = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (3.31)$$

donde T_{sky} es la temperatura cielo. En este estudio, la temperatura cielo se determina a partir de la norma ISO 13790:

$$T_{sky} = T_\infty - 13 \text{ K} \quad (3.32)$$

3.4. Sistema de aire acondicionado

La comodidad del cuerpo humano depende de tres factores: la temperatura, la humedad relativa y el movimiento del aire. La temperatura del aire es el aspecto más importante en la comodidad. La mayor parte de la gente se siente cómoda con una temperatura ambiente entre 295 K y 300 K [86]. Para mantener una edificación a la temperatura deseada son necesarios algunos procesos definidos como acondicionamiento de aire. En la **Figura 3.4** se ejemplifica un sistema de acondicionamiento de aire, conformado por evaporador, condensador, compresor y válvula de estrangulación. El sistema también cuenta con un

termostato y un sistema de control para mantener la temperatura interior en el valor deseado.

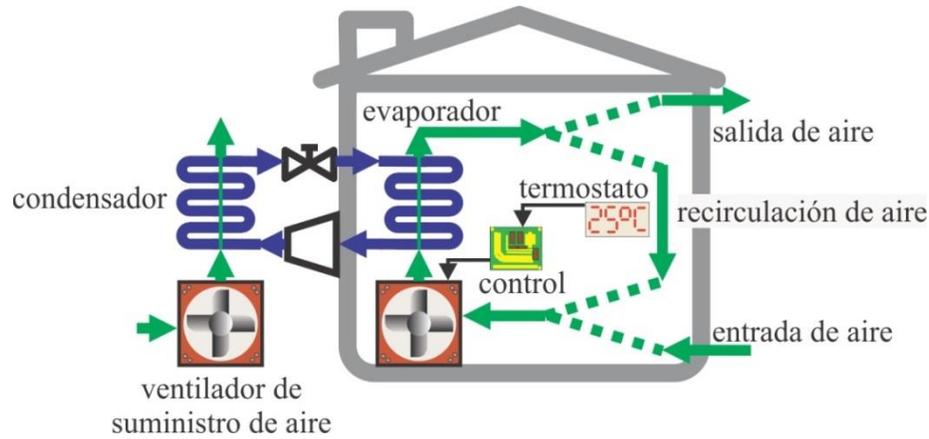


Figura 3.4. Sistema de acondicionamiento de aire.

Para determinar el consumo de energía eléctrica debido al uso de un sistema de aire acondicionado, se emplea el coeficiente de desempeño térmico (COP), el cual está dado por [86]:

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (3.33)$$

donde \dot{W} es la potencia eléctrica consumida por el sistema de aire acondicionado. Por lo tanto, la energía eléctrica consumida está dada por:

$$E_{ac} = \dot{W}t_{ac} \quad (3.34)$$

donde t_{ac} es el tiempo de operación del sistema de aire acondicionado. Para este estudio se considera que $COP = 5.0$, $Q_c = 7,000W$ y que el sistema de aire acondicionado cuenta con un control on/off donde:

$$\begin{aligned}
 T_{in} &> 297.15 \text{ K} \rightarrow \text{on (sistema encendido)} \\
 T_{in} &< 293.15 \text{ K} \rightarrow \text{off (sistema apagado)}
 \end{aligned}
 \tag{3.35}$$

3.5. Índices para la evaluación del rendimiento térmico

3.5.1. Resistencia térmica equivalente

La resistencia térmica equivalente se ha utilizado para evaluar la capacidad de aislamiento de los techos verdes, puede ser evaluada a partir de:

$$R_{TE} = \frac{T_{s,ex} - T_{s,in}}{q_{md}}
 \tag{3.36}$$

donde q_{md} es el flux medio de calor transferido a través del techo al interior del edificio, $T_{s,ex}$ y $T_{s,in}$ son la temperatura media de la superficie exterior e interior del techo, respectivamente. En la **Figura 3.5** se muestra donde es tomada la temperatura media de las superficies interior y exterior.

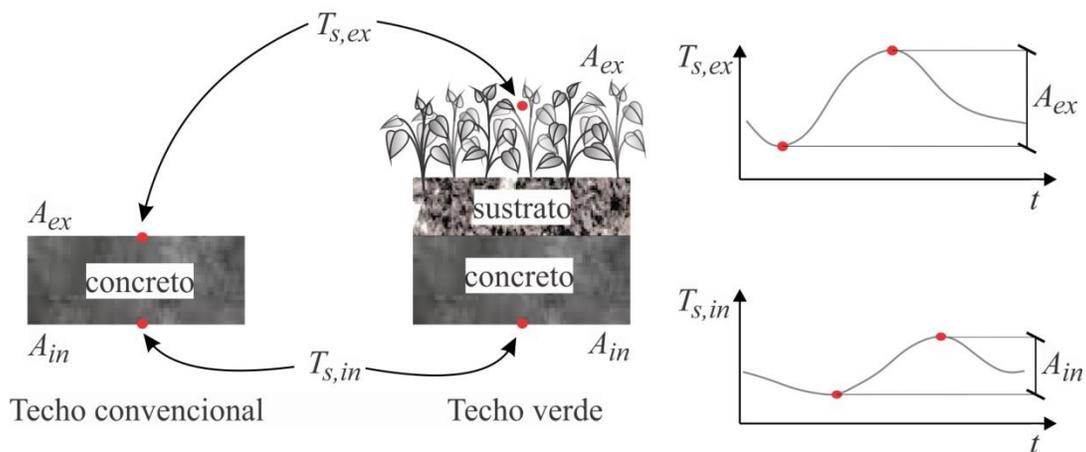


Figura 3.5. Puntos donde se toman la temperatura media de las superficies interior y exterior.

3.5.2. Factor de disminución equivalente

El factor de disminución equivalente se utiliza para caracterizar la capacidad de la envolvente del edificio para resistir las fluctuaciones periódicas de la temperatura del aire, también se le conoce como capacidad de inercia térmica. Se define como la relación de las amplitudes diarias máximas de las fluctuaciones de temperatura interna y externa [87]:

$$f = \frac{A_{in}}{A_{ex}} \quad (3.37)$$

donde A_{in} y A_{ex} son la amplitud de temperatura en la superficie interior y exterior, respectivamente.

3.5.3. Factor de climatización

En este trabajo se propone el factor de climatización para indicar que tan lejos está la temperatura interior de la temperatura de confort térmico. Un alto valor del factor de climatización indica que para alcanzar la temperatura de confort se requiere consumir más energía en equipos de climatización, un valor del factor de climatización cercano a cero indica que se requiere una menor cantidad de energía para alcanzar la temperatura de confort.

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{in,i} - T_{confort}|}{nT_{confort}} \quad (3.38)$$

3.6. Solución numérica

Las ecuaciones diferenciales son resueltas numéricamente por el método de diferencias finitas. Las Ecs. (3.1), (3.15) y (3.19) son de la forma:

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3.39)$$

Aplicando el método de diferencias finitas se tiene:

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \frac{k_{ef}}{(\rho C_p)_{ef}} (T_{j+1}^t - 2T_j^t + T_{j-1}^t) \quad (3.40)$$

Las condiciones de frontera (Ecs. (3.3), (3.11) y (3.24)) son de la forma:

$$-k \frac{dT}{dz} = \sum q_m \quad (3.41)$$

donde q_m es la m -ésimo flux de calor. La Ec. (3.41) se puede reescribir como:

$$T_{j+1} = T_j - \frac{\Delta z}{k} \sum q_m \quad (3.42)$$

mientras que la Ec. (3.12) tiene la siguiente forma:

$$T_{in}^{t+\Delta t} = T_{in}^t + \Delta t \left[\frac{Q}{(mC_p)_{in}} + \dot{m}(h_{\infty} - h_{in}) \right] \quad (3.43)$$

La solución numérica, de los modelos matemáticos de transferencia de calor para los edificios con techo convencional y con techo verde, es implementada en Python 3.6.3. El tamaño de paso temporal es de $\Delta t = 1.0s$. Mientras que el tamaño del paso espacial para los elementos constructivos, incluyendo todas las paredes y el techo convencional es $\Delta z = 0.01m$; el tamaño de paso espacial para el techo verde es de $\Delta z = 0.03m$. Los nodos de la malla espacial utilizados para la estimación del perfil de temperaturas en el techo se muestran en la **Figura 3.6**.

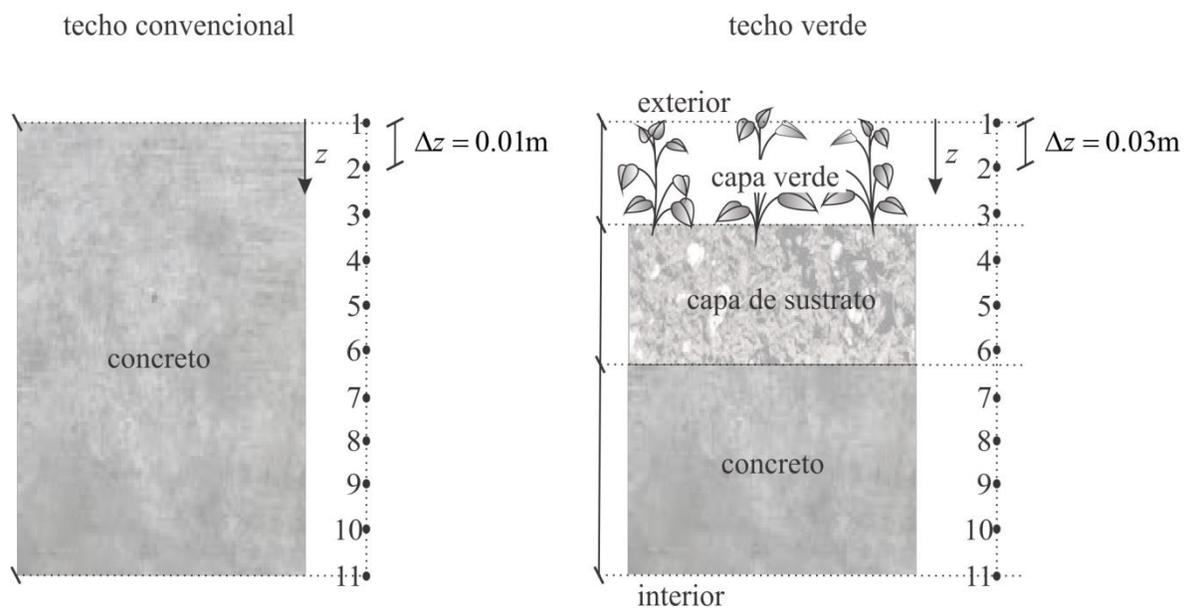


Figura 3.6. Nodalización para el techo convencional y el techo verde.

4. Validación del Modelo Matemático

Feng et al. [57] reportan los valores de radiación solar, temperatura de bulbo seco, punto de rocío y la velocidad del viento. Estos datos se utilizan en el presente estudio para la validación del modelo propuesto. Los valores de las propiedades de los materiales se presentan en la **Tabla 4.1**. Los valores paramétricos utilizados para la validación del modelo se indican en la **Tabla 4.2**. Los datos meteorológicos se muestran en las **Figuras 4.1 – 4.4** y se obtuvieron el 21 de julio de 2009 a partir de las 9.00 horas en la ciudad de Guangzhou, China.

Tabla 4.1. Propiedades de los materiales del techo verde.

Property	Plants	Soil	Concrete	Air	Water
C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	4800	840	840	1007	4186
ρ (kg m ⁻³)	582	1200	1800	1.184	1000
k (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.350	1.000	0.800	0.0255	0.580

Para validar el modelo, se compara la temperatura de la capa verde con la temperatura de la planta a partir de los datos reportados por Feng et al. [57]. Las principales desviaciones de los resultados presentan un error absoluto inferior a 3 K, como se muestra en la **Figura 6**. Esta desviación se debe a que la temperatura en el interior del edificio se considera constante, pero en realidad oscila en torno a 299.15 K, según los autores. Por lo tanto, de acuerdo con los resultados, la precisión del modelo propuesto en el presente trabajo se considera aceptable.

Tabla 4.2. Valores paramétricos.

Parámetro	Valor	Unidades
α^*	0.85	adimensional
ε^*	1.0	adimensional
TC^*	20	adimensional
R_{ep}/R_{tp}^*	1.0	adimensional
ζ_w	0.24	adimensional
ζ_a	0.50	adimensional
λ	2430000	J kg ⁻¹
σ	5.67×10^{-8}	W m ⁻² K ⁻⁴
T_{in}^*	299.15	K
b	0.06	m
c	0.09	m
γ	0.15	m

* Datos obtenidos a partir de [Feng et al. \[57\]](#).

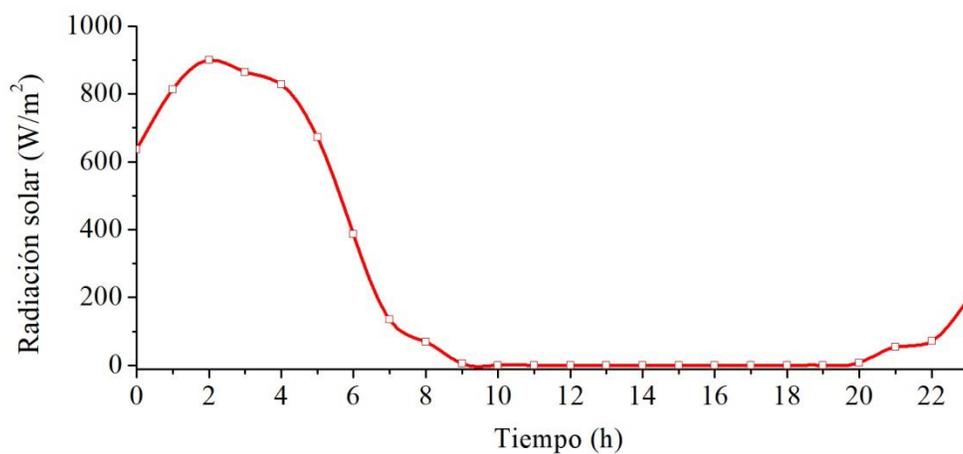


Figura 4.1. Radiación solar tomando como 0 las 9:00 hrs. Datos obtenidos de [Feng et al. \[57\]](#).

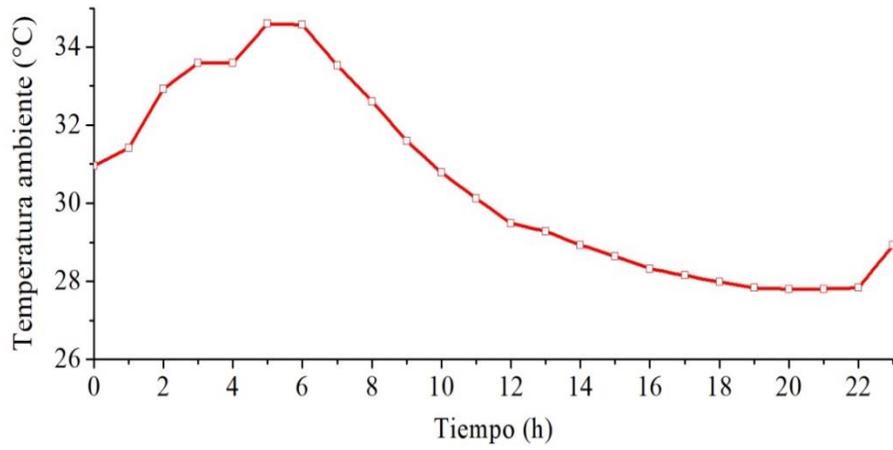


Figura 4.2. Temperatura ambiente tomando como 0 las 9:00 hrs. Datos obtenidos de [Feng et al. \[57\]](#).

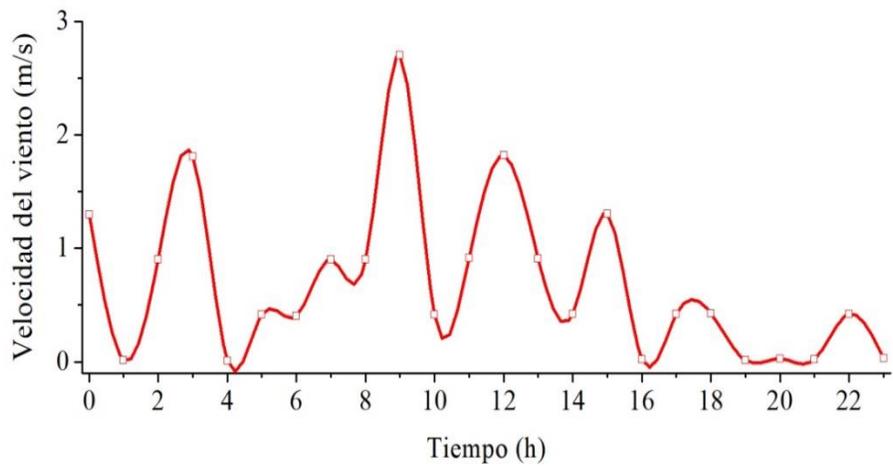


Figura 4.3. Velocidad del viento tomando como 0 las 9:00 hrs. Datos obtenidos de [Feng et al. \[57\]](#).

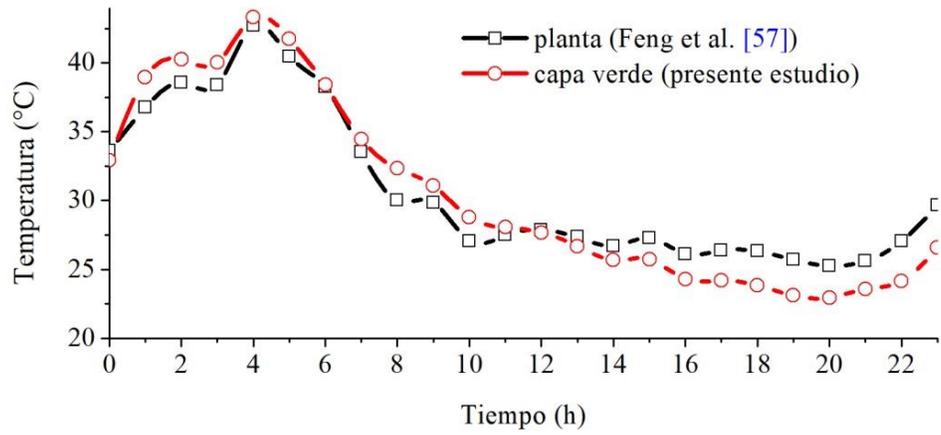


Figura 4.4. Validación del modelo matemático, comparando los resultados con datos experimentales, tomando como 0 las 9:00 hrs.

5. Casos de Estudio

En este trabajo se evalúa el comportamiento térmico de un edificio considerando condiciones climáticas de tres diferentes regiones de México, cada uno de ellos con una condición climática específica: el primer caso de estudio se realiza para la Ciudad de México, que tiene un clima cálido subhúmedo, el segundo caso es para el estado de Yucatán con un clima cálido subhúmedo y finalmente el caso de un edificio ubicado en el estado de Coahuila donde el clima es cálido y seco.

Para los tres casos de estudio, se considera un edificio de 4 m de largo, 4 m de ancho y 3 m de altura. Las envolturas son cuerpos grises de concreto con un espesor de 15 cm.

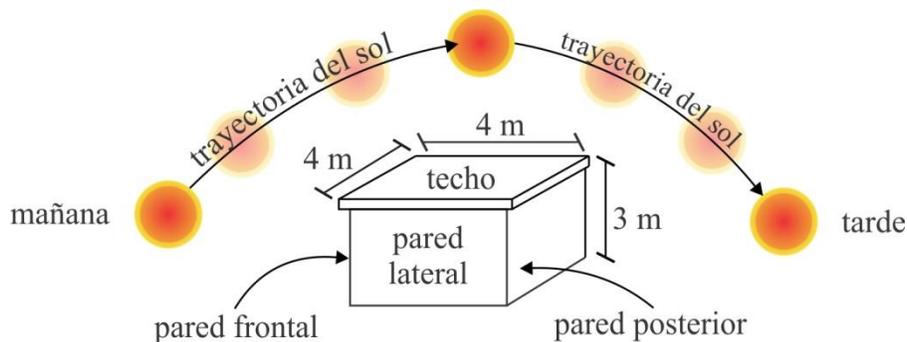


Figura 5.1. Radiación solar recibida por el edificio a lo largo del día.

El edificio se calienta por la radiación solar que recibe a través de dos paredes laterales opuestas y el techo, como se muestra en la **Figura 5.1**. Una pared recibe la radiación solar durante la mañana mientras que la pared opuesta recibe la radiación solar durante la tarde. Para este estudio, se considera que las otras dos paredes laterales no reciben radiación solar, también se desprecian los efectos de sombreado. Para llevar a cabo el estudio, se utilizaron las condiciones climáticas reportadas durante una semana en la Ciudad de México, Yucatán

y Coahuila. Estas condiciones se muestran en las **Figuras 5.2 – 5.7**. Los datos fueron obtenidos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Estos datos están reportados cada 10 minutos, pero para fines prácticos se tomaron los promedios en intervalos de una hora (iniciando a las 00:00 horas del 8 de Julio del 2019 hasta las 24:00 horas del 14 de Julio del 2019).

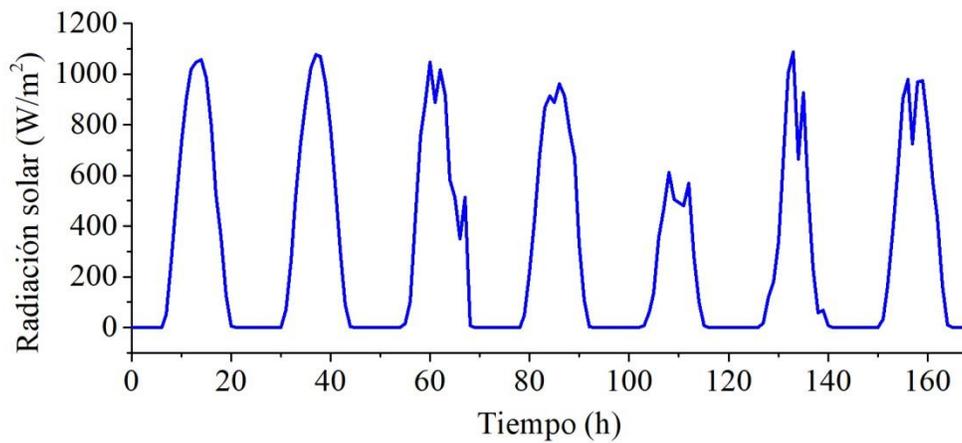


Figura 5.2. Radiación solar en la Ciudad de México (latitud 19.42° , longitud -99.19°).

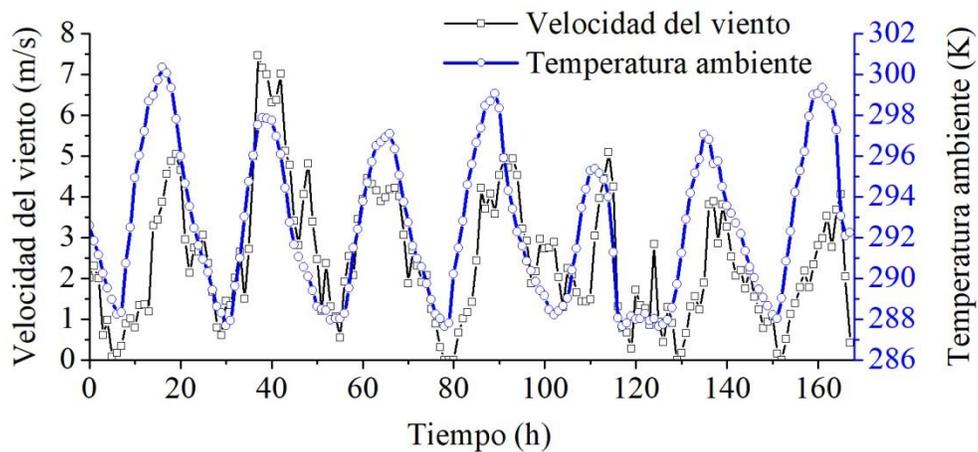


Figura 5.3. Velocidad del viento y temperatura ambiente en la Ciudad de México (latitud 19.42° , longitud -99.19°).

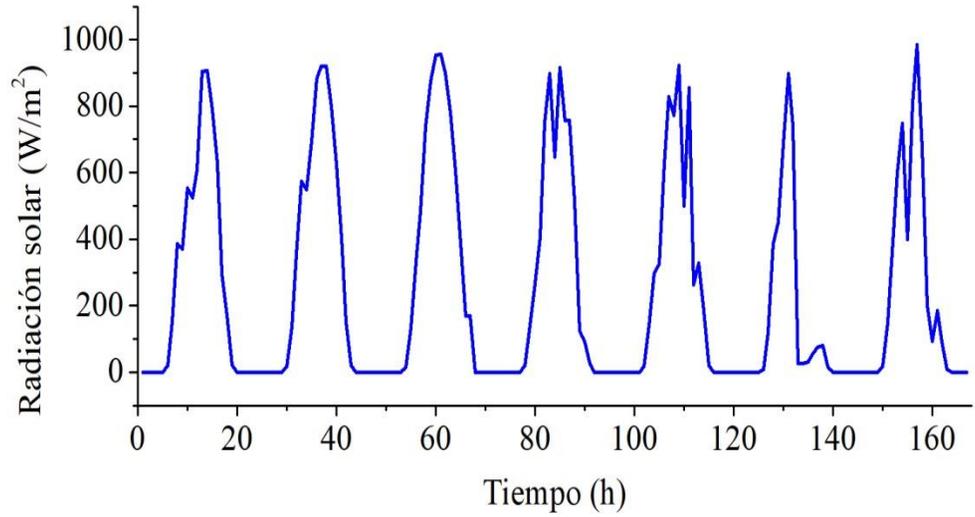


Figura 5.4. Radiación solar en la Yucatán (latitud 20.69° , longitud -88.20°).

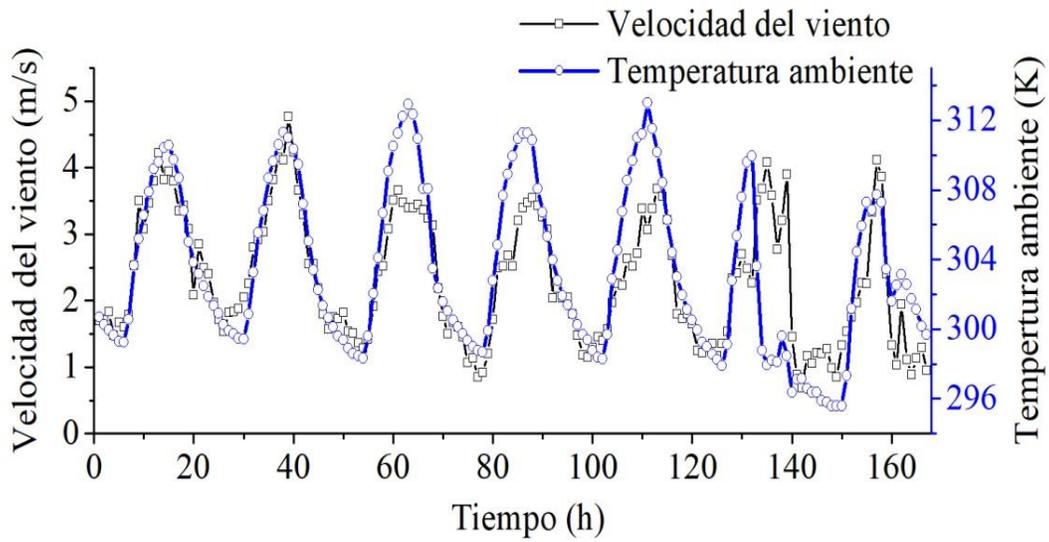


Figura 5.5. Velocidad del viento y temperatura ambiente en Yucatán (latitud 20.69° , longitud -88.20°).

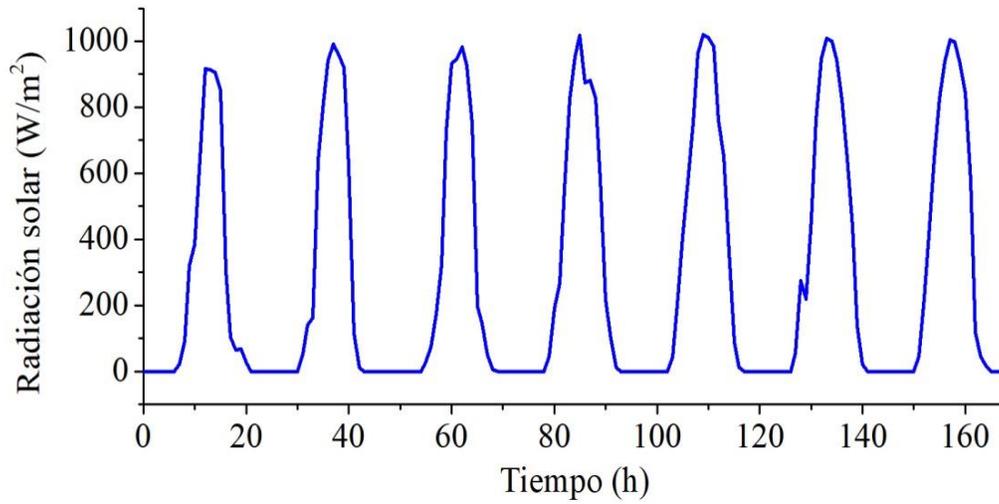


Figura 5.6. Radiación solar en la Coahuila (latitud 26.90° , longitud -101.43°).

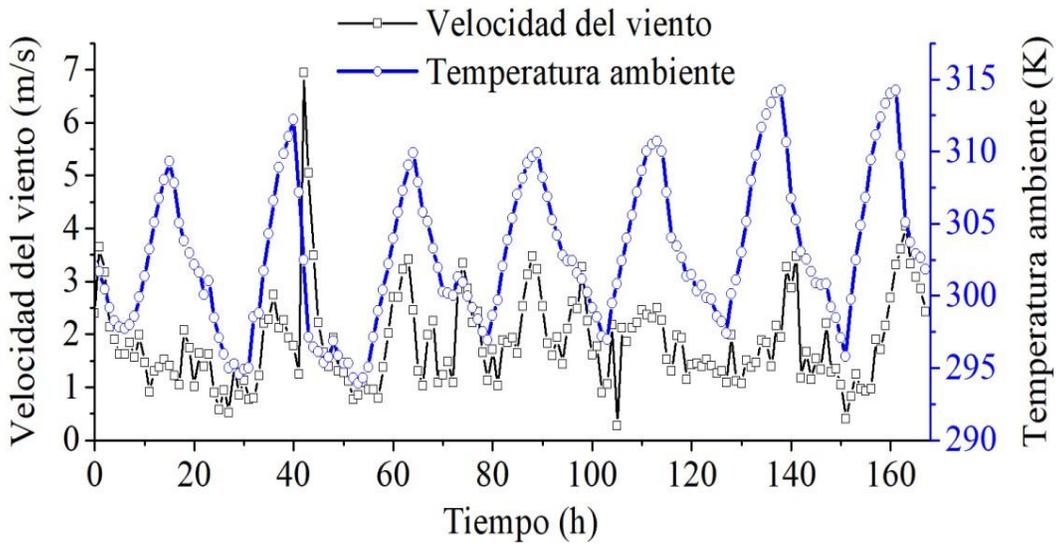


Figura 5.7. Velocidad del viento y temperatura ambiente en Coahuila (latitud 26.90° , longitud -101.43°).

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos para los tres casos de estudio.

6. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos. En la primera sección se muestra el efecto de los techos verdes sobre la temperatura interior del edificio. En la segunda sección se muestra el efecto de los techos verdes en el ahorro de energía por climatización en un edificio de un solo piso para la Ciudad de México (latitud 19.42° , longitud -99.19°), Yucatán (latitud 20.69° , longitud -88.20°) y Coahuila (latitud 26.90° , longitud -101.43°).

6.1 Edificaciones sin aire acondicionado

Los resultados de las simulaciones realizadas para Ciudad de México, Yucatán y Coahuila se muestran en las **Figuras 6.1 – 6.3**, respectivamente. Para estos tres casos, el sistema de aire acondicionado no está simulado todavía, esto con el objetivo de observar el comportamiento de la temperatura interna del edificio y calcular los índices de rendimiento térmico. También se considera al edificio como un sistema cerrado, es decir se desprecia el intercambio de materia a través de las puertas y ventanas.

En la **Figuras 6.1**, la temperatura para el interior del edificio con techo convencional varía desde los 287 K hasta los 314 K ($14^\circ\text{C} - 41^\circ\text{C}$), mientras que la temperatura del techo verde va desde los 289 K hasta un poco más de 301 K ($16^\circ\text{C} - 28^\circ\text{C}$) para la Ciudad de México. Se puede ver que con la implementación del techo verde, la temperatura interior del edificio se acerca a la temperatura de confort que es de aproximadamente 298 K (25°C), disminuyendo la temperatura interna promedio en 5 K.

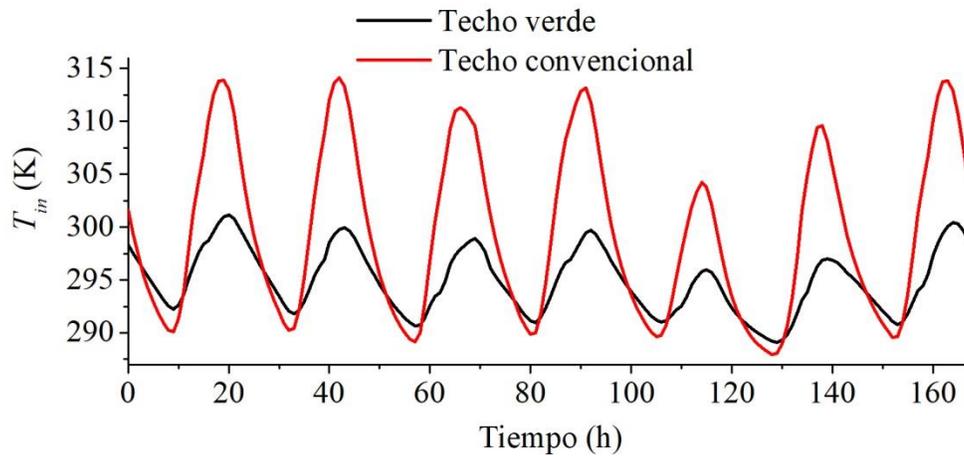


Figura 6.1. Comparación de la temperatura interna entre el edificio con techo convencional y el edificio con techo verde localizado en la Ciudad de México.

En la **Figuras 6.2** se muestran los resultados obtenidos para Yucatán, la temperatura en el interior del edificio con techo convencional varía desde los 294 K hasta los 322 K (21°C – 49°C), mientras que la temperatura del techo verde va desde los 297 K hasta un poco más de 311 K (24°C – 38°C). Se puede observar que con la implementación del techo verde, la amplitud de la temperatura se reduce a la mitad, es decir, pasa 28 K a 14 K; también contribuyen a disminuir la temperatura interna promedio en 2 K.

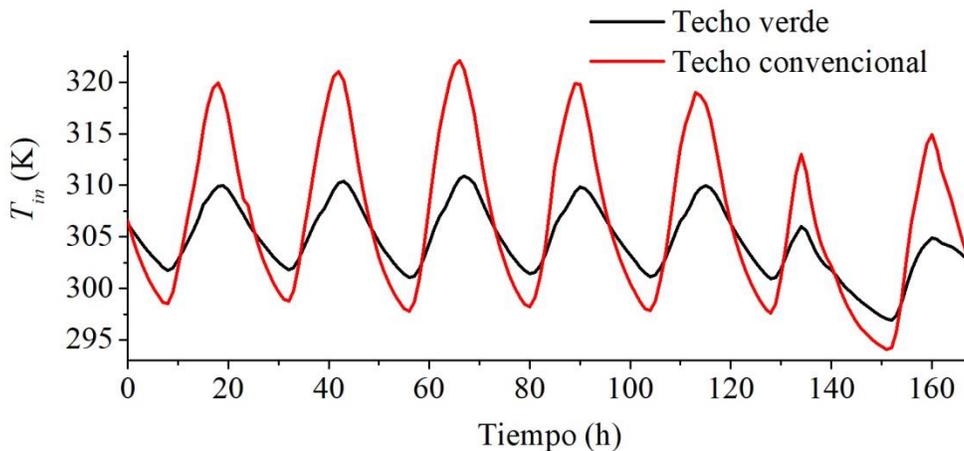


Figura 6.2. Comparación de la temperatura interna entre el edificio con techo convencional y el edificio con techo verde localizado en Yucatán.

En la **Figura 6.3** se muestra la temperatura para el interior del edificio con techo convencional que varía desde los 294 K hasta los 324 K (21°C – 51°C), mientras que la temperatura del techo verde va desde los 296 K hasta un poco más de 312 K (23°C – 39°C), ambos casos para Coahuila. Con lo que la implementación del techo verde reduce la amplitud de la oscilación de la temperatura interna del edificio en casi la mitad de 30 K a 16 K; también contribuyen a disminuir la temperatura interna promedio en 4 K.

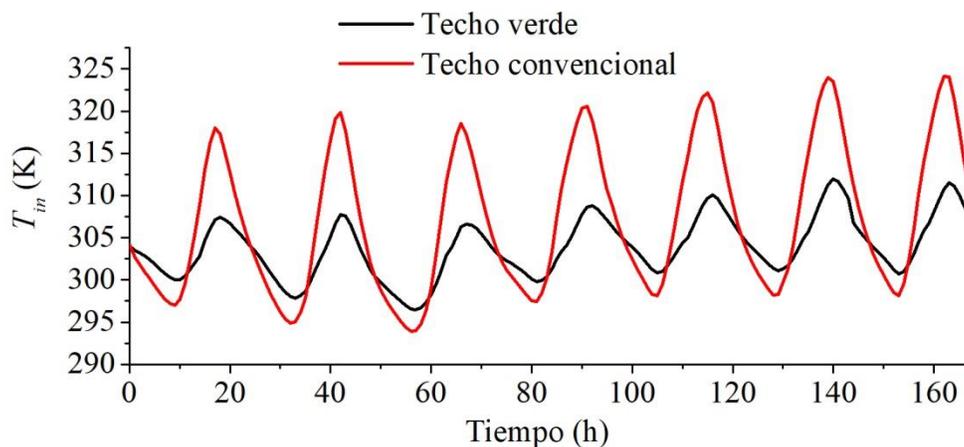


Figura 6.3. Comparación de la temperatura interna entre el edificio con techo convencional y el edificio con techo verde localizado en Coahuila.

En la **Tabla 6.1** se presenta un resumen de los resultados, donde se reportan los valores de temperatura interna máxima y mínima obtenidos durante una semana de simulación (8 de julio a 14 de julio de 2019), también se reportan la amplitud de la oscilación y la temperatura interna promedio.

Tabla 6.1. Resumen de las temperaturas obtenidas para el techo convencional y el techo verde ubicados en diferentes regiones de México.

Ciudad	Tipo de techo	Temperatura (K)			
		Interna		Amplitud	Promedio
		Max	Min		
Ciudad de México	Convencional	314	287	27	299.41
	Verde	301	289	12	294.89
Yucatán	Convencional	322	294	28	306.79
	Verde	311	297	14	304.64
Coahuila	Convencional	324	294	30	307.07
	Verde	312	296	16	303.84

Como se puede ver en los tres casos, los techos verdes contribuyen a reducir la amplitud de la oscilación de la temperatura interna del edificio; también contribuyen a disminuir la temperatura interna promedio. Los techos verdes pueden ayudar a reducir la amplitud de oscilación de la temperatura interna hasta 14 K. La temperatura máxima en el interior del edificio se puede reducirse hasta 12 K. Esto se debe a que, los techos verdes, proporcionan un importante efecto de enfriamiento tanto durante el verano como en regiones con clima cálido [88,89].

Estos resultados son congruentes con estudios previos que concluyen que los techos verde reducen el pico de temperatura interna diaria, atenuándolo significativamente en comparación con un techo convencional [90]. Además los resultados coinciden con estudios experimentales realizados en México con células de prueba [72,91].

6.1.1. Índices de rendimiento térmico

En la **Tabla 6.2** se reportan los valores obtenidos de los índices para la evaluación del rendimiento térmico para la Ciudad de México. La resistencia térmica equivalente (Ec.(3.36)) permanece constante con un valor de $0.1875 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ para el techo convencional y $0.3750 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ para el techo verde, el factor de disminución equivalente (Ec.(3.37)) promedio ($f_{\text{prom}}=0.2089$) y el factor de climatización (Ec.(3.38)) promedio ($f_{c,\text{prom}}=0.0086$) en los techos verdes, son menores en comparación con el factor de disminución equivalente promedio ($f_{\text{prom}}=0.5056$) y el factor de climatización promedio ($f_{c,\text{prom}}=0.0245$) en los techos convencionales, lo cual quiere decir que en los edificios con techos verdes se tendrá un menor consumo de energía eléctrica por uso de aire acondicionado.

Tabla 6.2. Índices del rendimiento térmico para la Ciudad de México.

Día	Convencional			Verde		
	R_{TE} ($\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$)	f (-)	f_c (-)	R_{TE} ($\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$)	f (-)	f_c (-)
1	0.1875	0.5312	0.0277	0.3750	0.2215	0.0093
2	0.1875	0.5263	0.0268	0.3750	0.1990	0.0081
3	0.1875	0.5022	0.0258	0.3750	0.2182	0.0085
4	0.1875	0.5347	0.0266	0.3750	0.1905	0.0083
5	0.1875	0.4613	0.0135	0.3750	0.2177	0.0061
6	0.1875	0.4525	0.0235	0.3750	0.1809	0.0106
7	0.1875	0.5314	0.0276	0.3750	0.2349	0.0098

En la **Tabla 6.3** se reportan los valores obtenidos de los índices para la evaluación del rendimiento térmico para Yucatán. Se puede ver que la resistencia térmica equivalente permanece constante con un valor de $0.1875 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ para el techo convencional, mientras que para el techo verde tiene un valor de $0.3750 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$, el factor de disminución

equivalente promedio ($f_{\text{prom}}=0.2617$) y el factor de climatización promedio ($f_{c,\text{prom}}=0.0322$) son menores en los techos verdes en comparación con los techos convencionales ($f_{\text{prom}}=0.4831$ y $f_{c,\text{prom}}=0.0393$), lo que implica una disminución en el consumo de energía eléctrica por uso de aire acondicionado en los edificios con techos verdes.

Tabla 6.3. Índices del rendimiento térmico para Yucatán.

Día	Convencional			Verde		
	R_{TE} ($\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$)	f (-)	f_c (-)	R_{TE} ($\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$)	f (-)	f_c (-)
1	0.1875	0.5167	0.0406	0.3750	0.3216	0.0321
2	0.1875	0.5294	0.0460	0.3750	0.2632	0.0369
3	0.1875	0.5329	0.0471	0.3750	0.2890	0.0368
4	0.1875	0.4985	0.0440	0.3750	0.2302	0.0362
5	0.1875	0.4723	0.0426	0.3750	0.2521	0.0358
6	0.1875	0.3784	0.0271	0.3750	0.2443	0.0268
7	0.1875	0.4540	0.0282	0.3750	0.2316	0.0211

En la **Tabla 6.4** se reportan los valores obtenidos de los índices para la evaluación del rendimiento térmico para Coahuila. La resistencia térmica equivalente permanece constante con un valor de $0.1875 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ para el techo convencional y $0.3750 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ para el techo verde, el factor de disminución equivalente y el factor de climatización ($f_{\text{prom}}=0.2612$ y $f_{c,\text{prom}}=0.0300$) son menores en los techos verdes que los factores de los techos convencionales ($f_{\text{prom}}=0.5160$ y $f_{c,\text{prom}}=0.0406$), con lo cual se tendría que en los edificios con techos verdes el consumo de energía eléctrica sería menor por uso de aire acondicionado.

Tabla 6.4. Índices del rendimiento térmico para Coahuila.

Día	Convencional			Verde		
	R_{TE} (m ² K W ⁻¹)	f (-)	f_c (-)	R_{TE} (m ² K W ⁻¹)	f (-)	f_c (-)
1	0.1875	0.5042	0.0325	0.3750	0.2443	0.0251
2	0.1875	0.5178	0.0333	0.3750	0.2402	0.0244
3	0.1875	0.5151	0.0315	0.3750	0.2770	0.0212
4	0.1875	0.4993	0.0420	0.3750	0.2698	0.0303
5	0.1875	0.5177	0.0466	0.3750	0.2362	0.0345
6	0.1875	0.5246	0.0488	0.3750	0.3217	0.0369
7	0.1875	0.5336	0.0500	0.3750	0.2397	0.0379

El valor de la resistencia térmica equivalente es mayor para el techo verde y se mantiene constante para todos los casos. El factor de disminución equivalente es mayor en todos los casos para el techo convencional, lo cual implica que es menor la amplitud de la oscilación de la temperatura en la edificación con techo verde. Mientras que el factor de climatización en todos los casos es mayor para los techos convencionales, por lo tanto los edificios con esta tecnología deben de invertir una mayor cantidad de energía en climatización para llegar a condiciones de confort térmico. También se puede ver que la Ciudad de México tiene los factores de climatización más bajos, mientras que Coahuila tiene los factores de climatización más altos.

6.2. Edificaciones con aire acondicionado

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones realizadas teniendo en cuenta que ambos edificios tienen un sistema de aire acondicionado instalado con control de on/off. Las **Figuras 6.4, 6.6 y 6.8** muestran el cambio de temperatura interna, con respecto al tiempo, para los edificios tanto con techo verde como con techo convencional para la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila, respectivamente.

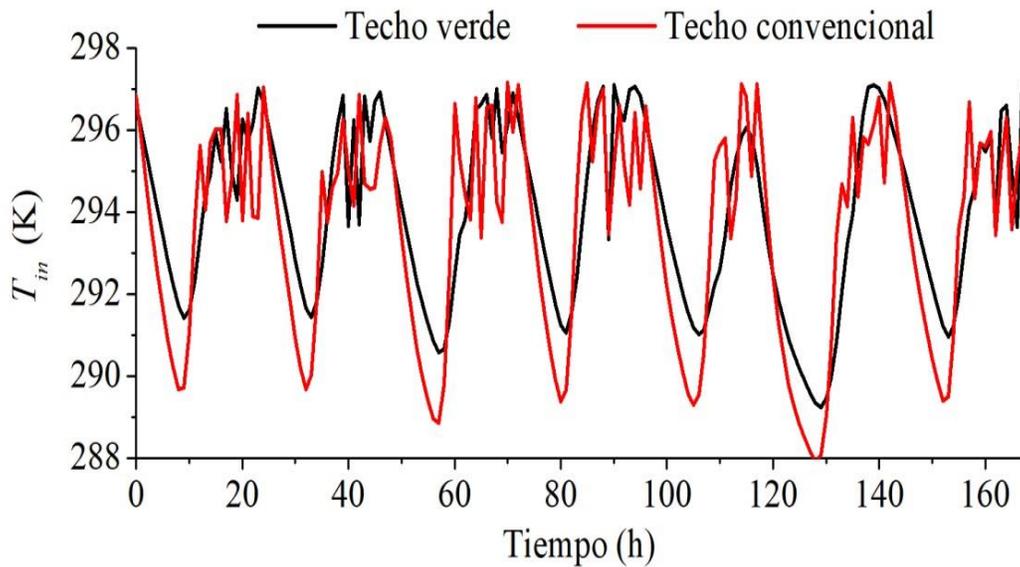


Figura 6.4. Comparación de la temperatura interna entre edificios con techo convencional y techo verde con sistema de aire acondicionado ubicados en la Ciudad de México.

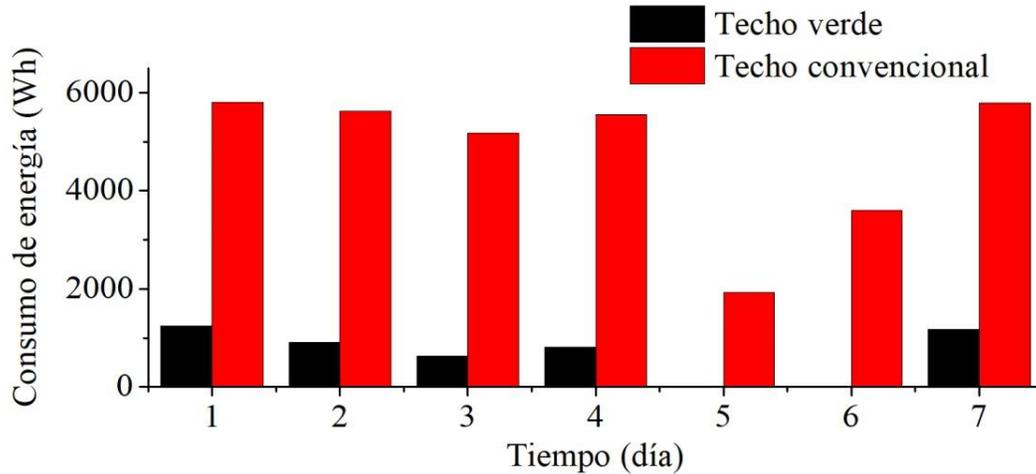


Figura 6.5. Comparación del consumo de energía entre edificios con techo convencional y techo verde con sistema de aire acondicionado ubicados en la Ciudad de México.

Adicionalmente, las **Figuras 6.5, 6.7 y 6.9** muestran el consumo de energía debido al uso del aire acondicionado. La **Figura 6.4** muestra, para la Ciudad de México, que el número de ciclos de encendido y apagado del sistema de aire acondicionado es menor para el edificio con techo verde. Además, se puede ver que el consumo de energía disminuye considerablemente con el techo verde (ver **Figura 6.5**). Los días 5 y 6 no se enciende el equipo de aire acondicionado, esto es congruente con los valores obtenidos para el factor de climatización que presenta su valor más bajo para el día 5 y la inercia térmica se extiende hasta el día 6.

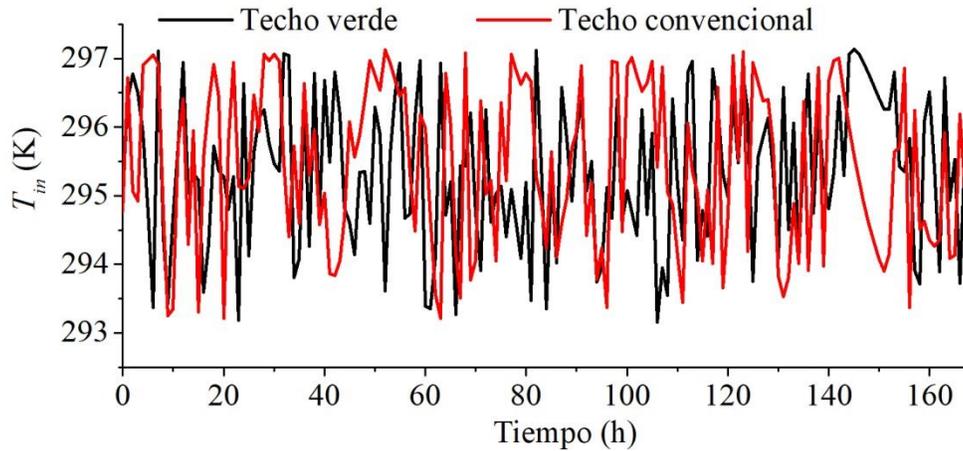


Figura 6.6. Comparación de la temperatura interna entre edificios con techo convencional y techo verde con sistema de aire acondicionado ubicados en Yucatán.

Como se puede ver en la **Figura 6.7** la cantidad de energía necesaria para la climatización del edificio es menor cuando se tiene un techo verde. Durante los días 6 y 7 se consume una menor cantidad de energía, esto es congruente con el factor de climatización que presenta su menor valor para ambos días.

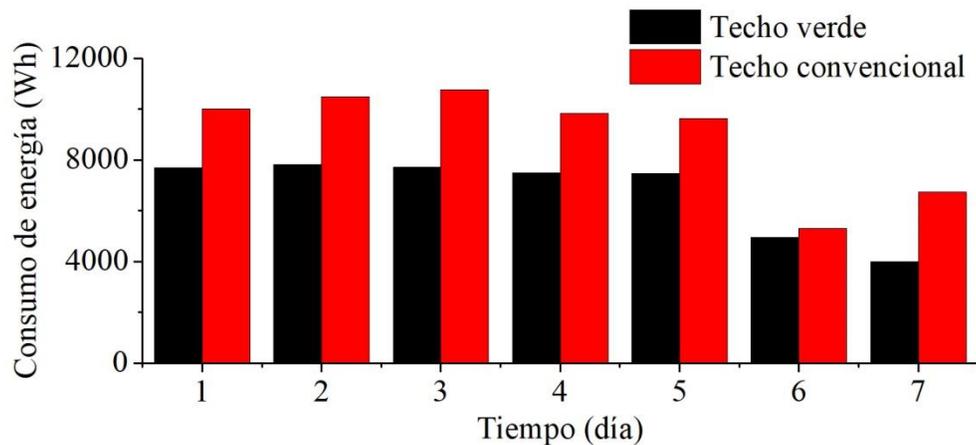


Figura 6.7. Comparación del consumo de energía entre edificios con techo convencional y techo verde con sistema de aire acondicionado ubicados en Yucatán.

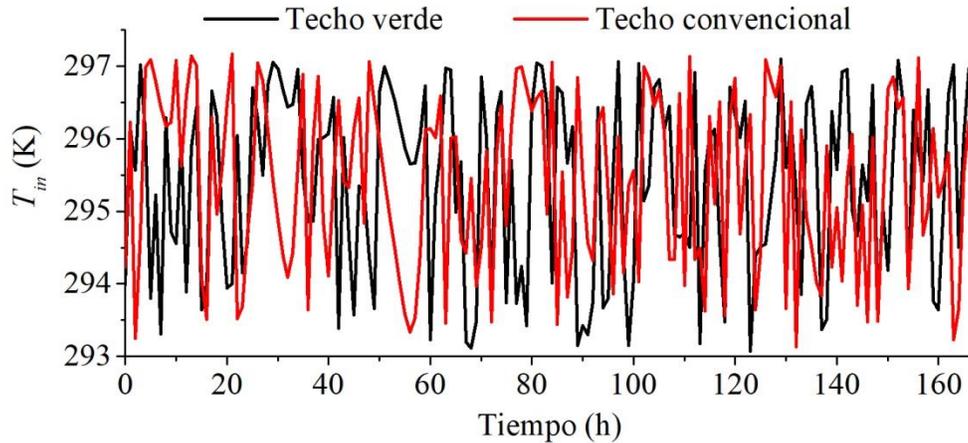


Figura 6.8. Comparación de la temperatura interna entre edificios con techo convencional y techo verde con sistema de aire acondicionado ubicados en Coahuila.

En Coahuila es donde más energía se consume en climatización, esto es congruente con los valores del factor de climatización, que son mayores para esta zona. Como se puede ver en la **Figura 6.9** durante los tres primeros días el consumo de energía tiene una tendencia decreciente al igual que el factor de climatización, para el día 4 el factor de climatización crece de manera importante y continua creciendo hasta el día 7 al igual que el consumo de energía. Esto es debido a que la temperatura ambiente comenzó a crecer a partir del día 4.

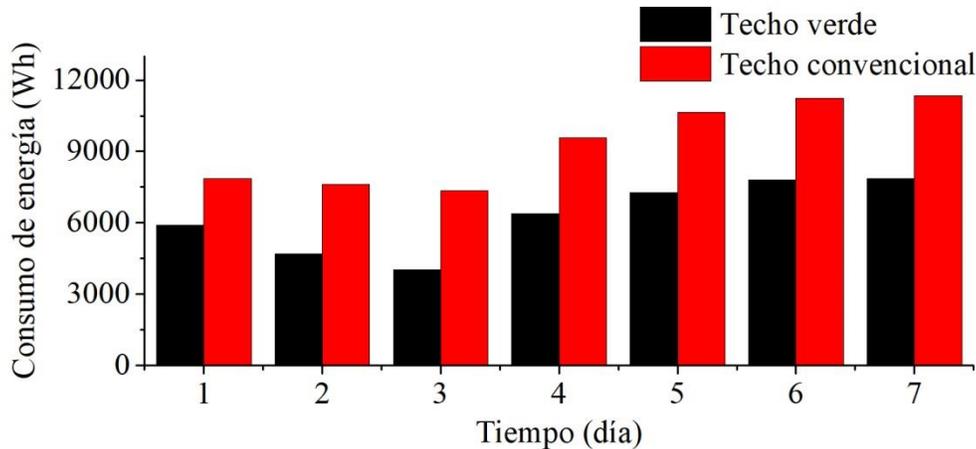


Figura 6.9. Comparación del consumo de energía entre edificios con techo convencional y techo verde con sistema de aire acondicionado ubicados en Coahuila.

En la **Tabla 6.5** se reporta el ahorro de energía, en cada caso de estudio, debido al techo verde. En Yucatán se ahorra casi el 25% de la energía, mientras que en Coahuila se puede ahorrar el 33%, en la Ciudad de México se puede ahorrar poco más del 85% de la energía consumida por un sistema de aire acondicionado.

Tabla 6.5 Ahorro de energía por climatización debido al techo verde.

Ciudad	Tipo de techo	Consumo de energía (kWh)	Ahorro de energía con el techo verde	
			(kWh)	%
Ciudad de México	Convencional	33.48	28.69	85.69
	Verde	4.79		
Yucatán	Convencional	62.77	15.62	24.88
	Verde	47.15		
Coahuila	Convencional	65.65	21.69	33.04
	Verde	43.96		

Yucatán y Coahuila son más cálidos que la Ciudad de México; por lo tanto, el número de ciclos de encendido y apagado, del sistema de aire acondicionado, es mayor para ambas ciudades, como se muestra en las **Figuras 6.6** y **6.8**. Esto implica un mayor consumo de energía para el funcionamiento del aire acondicionado como se puede ver en las **Figuras 6.7** y **6.9**. Después de analizar estos casos se puede decir que los techos verdes contribuyen a alcanzar la temperatura de confort térmico y reducen el consumo de energía para la climatización de los edificios [92].

6.2.1. Flujo másico de aire

A continuación se toma como caso de estudio un día en Coahuila para estudiar el efecto que tiene la entrada de aire del exterior al interior del edificio. En la **Figura 6.10** se muestra la influencia del flujo másico del aire de entrada al edificio sobre la temperatura interior con techo convencional y sin sistema de aire acondicionado. A medida que aumenta el flujo másico el pico máximo de temperatura disminuye pero no se logra alcanzar la temperatura de confort térmico en ningún momento.

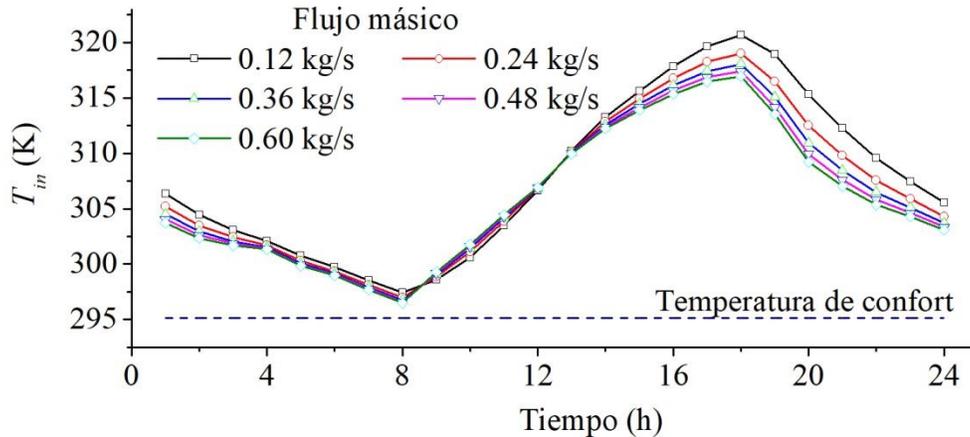


Figura 6.10. Influencia del flujo másico de aire en la temperatura interior del edificio con techo convencional.

En la **Figura 6.11** se muestra la influencia del flujo másico de aire sobre la temperatura interior del edificio con techo verde y sin sistema de aire acondicionado. Contario al caso anterior, el pico máximo de la temperatura en el interior del edificio aumenta conforme aumenta el flujo de aire de entrada. Sin embargo, al igual que en el caso anterior no se alcanza la temperatura de confort.

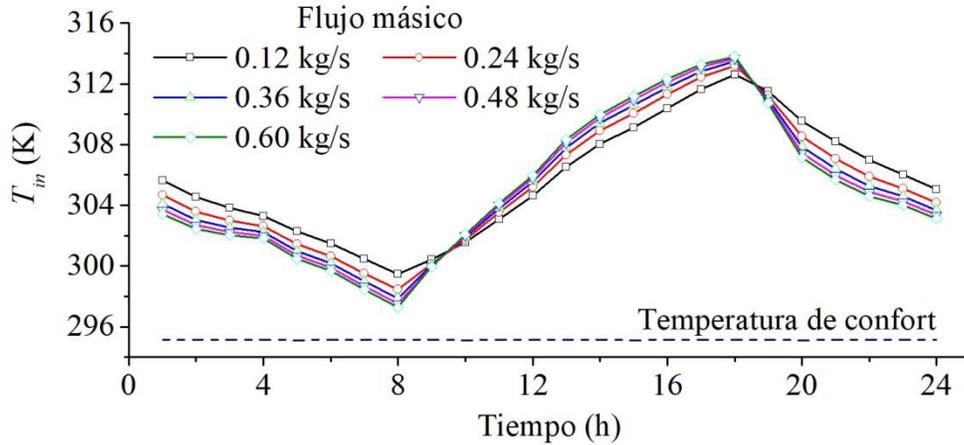


Figura 6.11. Influencia del flujo másico de aire en la temperatura interior del edificio con techo verde.

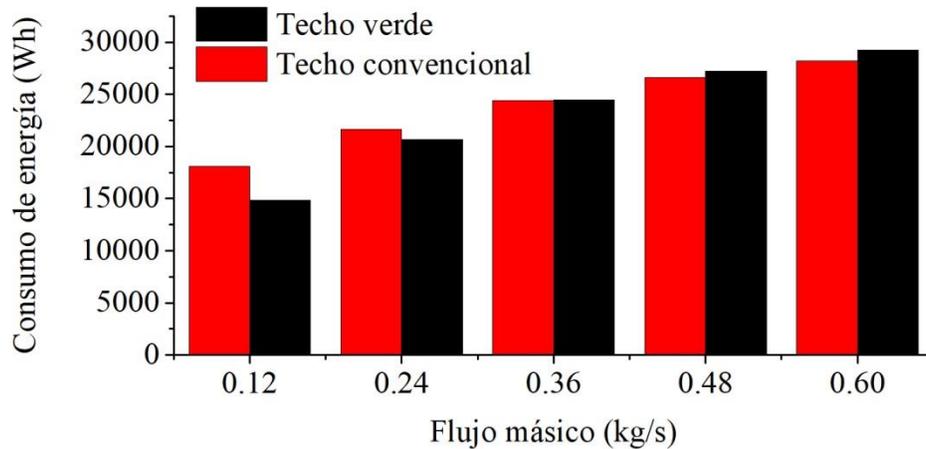


Figura 6.12. Consumo de energía por climatización para ambas edificaciones.

En la **Figura 6.12** se muestra el consumo de energía en ambas edificaciones en función del flujo másico de aire. A medida que aumenta el flujo de aire de entrada al edificio aumenta el consumo de energía por climatización, para los flujos másicos de 0.12 kg/s y 0.24 kg/s de aire el consumo de energía es mayor para el techo convencional, sin embargo a partir de un flujo másico de 0.36 kg/s es mayor el consumo de energía en el edificio con techo verde. Sin embargo, con el techo convencional se sobre pasa por mucho la temperatura de confort

térmico a partir de un flujo másico de aire de 0.24 kg/s como se muestra en la **Figura 6.13**.

Por lo tanto es indeseable la entrada de aire ambiente al interior del edificio.

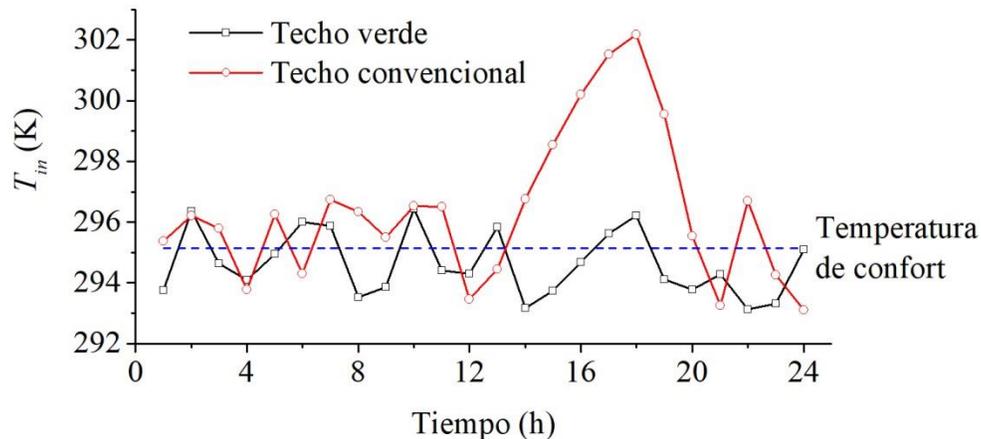


Figura 6.13. Temperatura interna del edificio con un flujo másico de aire de 0.24 kg/s

Estos resultados son congruentes con otros resultados obtenidos por diferentes investigadores. Por ejemplo: [Parizotto and Lamberts \[93\]](#) concluyen que los techos verdes reducen significativamente la ganancia de calor en comparación con tecnologías convencionales. Por su parte, [Heidarinejad and Esmaili \[45\]](#) realizan una comparación de estas dos tecnologías encontrando que los techos verdes pueden representar una reducción del 77% en la transferencia de calor. [Chagolla–Aranda et al. \[72\]](#) demuestran, por medio de resultados experimentales, que los techos verdes ayudan a disminuir el consumo eléctrico por climatización en comparación con techos convencionales. Esta reducción puede ser hasta del 80% según los resultados obtenidos por [Saadatian et al. \[2\]](#).

El potencial de refrigeración y calefacción de los techos verdes depende en gran medida del clima y de las características del edificio [\[94\]](#). Asimismo, el ahorro de energía está sujeto a

factores como: el tipo de techo verde, la profundidad y tipo de sustrato, las plantas, las condiciones de irrigación y la tasa de entrada al edificio de aire exterior [95].

La reciente y creciente conciencia ambiental ha provocado el desarrollo de nueva tecnología para reducir el impacto ambiental masivo debido a los edificios [96]. Los techos verdes pueden contribuir a desacelerar el cambio climático debido a los múltiples beneficios ambientales que ofrecen, aunque actualmente estos beneficios son difíciles de cuantificar [97]. La falta de promoción e incentivos de los gobiernos así como el aumento de los costos de mantenimiento, diseño y construcción se identifican como las principales barreras para la implementación de los techos verdes en el mundo [38,98].

El modelado de los techos verdes puede ser útil para que los habitantes, los constructores, los arquitectos, los ingenieros y los responsables políticos tengan una mejor comprensión del potencial de los techos verdes para mitigar los consumos de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero de una manera sostenible y eficiente energéticamente. Así el modelado y la simulación pueden ser útiles para proponer normas o políticas que incentiven la implementación de esta tecnología.

Los techos verdes además de ser adecuados para el desarrollo de nuevos edificios, con un enfoque sostenible, también son adecuados para la adaptación en edificios antiguos para hacer frente a la crisis energética.

7. Conclusiones

Este trabajo comparó térmicamente dos tipos de edificios, uno con un techo convencional y otro con un techo verde, ambos con un sistema de aire acondicionado. El estudio se llevó a cabo con las condiciones climáticas para la Ciudad de México, que tiene un clima cálido subhúmedo, para el estado de Yucatán con un clima cálido subhúmedo y para el estado de Coahuila con un clima cálido y seco. Se considera un edificio sin ventanas, es decir, no se tiene en cuenta el intercambio de masa entre el sistema y el ambiente. Los datos de entrada del modelo matemático son las propiedades térmicas de los materiales y las condiciones climáticas: radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente. Estos datos son fácilmente accesibles ya que son medidos por cualquier instalación meteorológica. No se encuentra un modelo matemático en la literatura que requiere tan pocos datos de entrada.

Los resultados obtenidos para los tres casos de estudios muestran que la amplitud de oscilación de la temperatura interna del edificio es menor cuando se tiene un techo verde. Los techos verdes ayudan a reducir la amplitud de oscilación de la temperatura interna hasta 14 K. La temperatura interna máxima del edificio se redujo hasta 12 K.

La resistencia térmica equivalente permanece constante y es menor en un 50%, en las tres regiones para los techos convencionales. Por lo tanto, la capacidad de aislamiento es el doble para los techos verdes. El comportamiento para el coeficiente de disminución equivalente se reduce entre 45% y 58% para los techos verdes, lo que implica que la amplitud de oscilación de la temperatura interna en el edificio es menor en el techo verde. Además, el factor de climatización se reduce entre 18% y 65%, por consiguiente se requiere

consumir una menor cantidad de energía eléctrica en equipos de climatización para alcanzar una temperatura de confort.

Si bien ventilar las edificaciones puede ayudar a disminuir la temperatura interior, no se logra alcanzar la temperatura de confort y es necesario utilizar equipos de acondicionamiento de aire, en estos casos la entrada de aire exterior al edificio trae consigo un mayor consumo de energía eléctrica para climatización.

Además, los resultados muestran que la implementación de techos verdes puede representar un ahorro de hasta 85% en climatización. Esto debido a que proporcionan un importante efecto de refrigeración durante el verano o en regiones geográficas con clima cálido.

Referencias

- [1] G. Zhang, B.J. He, B.J. Dewancker, The maintenance of prefabricated green roofs for preserving cooling performance: A field measurement in the subtropical city of Hangzhou, China, *Sustain. Cities Soc.* 61 (2020) 102314. doi:10.1016/j.scs.2020.102314.
- [2] O. Saadatian, K. Sopian, E. Salleh, C.H. Lim, S. Riffat, E. Saadatian, A. Toudeshki, M.Y. Sulaiman, A review of energy aspects of green roofs, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 23 (2013) 155–168.
- [3] A.B. Besir, E. Cuce, Green roofs and facades: A comprehensive review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 82 (2018) 915–939. doi:10.1016/J.RSER.2017.09.106.
- [4] M. Shafique, R. Kim, M. Rafiq, Green roof benefits, opportunities and challenges - A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 90 (2018) 757–773.
- [5] I. Teotónio, C. Matos Silva, C. Oliveira Cruz, Eco-solutions for urban environments regeneration: The economic value of green roofs, *J. Clean. Prod.* 199 (2018) 121–135.
- [6] T. Carter, A. Keeler, Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems, *J. Environ. Manage.* 87 (2008) 350–363.
- [7] C. Clark, P. Adriaens, B. Talbot, Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits, *Environ. Sci. Technol.* 42 (2008) 2155–2161.
- [8] G. Pérez, C. Chocarro, A. Juárez, J. Coma, Evaluation of the development of five Sedum species on extensive green roofs in a continental Mediterranean climate, *Urban For. Urban Green.* 48 (2020) 126566. doi:https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126566.
- [9] S. Cascone, F. Catania, A. Gagliano, G. Sciuto, A comprehensive study on green roof performance for retrofitting existing buildings, *Build. Environ.* 136 (2018).
- [10] J. Yang, Q. Yu, P. Gong, Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago, *Atmos. Environ.* 42 (2008) 7266–7273.
- [11] D. Suszanowicz, Model research on the influence of green roofs on environmental parameters in urban agglomerations, *E3S Web Conf.* 45 (2018).
- [12] J.C. Berndtsson, L. Bengtsson, K. Jinnob, Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs, *Ecol. Eng.* 35 (2009) 369–380.
- [13] J. Mentens, D. Raes, M. Hermy, Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, *Landsc. Urban Plan.* 77 (2006) 217–226.

- [14] A.F. Speak, J.J. Rothwell, S.J. Lindley, C.L. Smith, Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof, *Sci. Total Environ.* 461 (2013) 28–38.
- [15] I. Schultz, D.J. Sailor, O. Starry, Effects of substrate depth and precipitation characteristics on stormwater retention by two green roofs in Portland OR, *J. Hydrol. Reg. Stud.* 18 (2018) 110–118.
- [16] T.V. Renterghem, D. Botteldooren, Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs, *Build. Environ.* 44 (2009) 1081–1087.
- [17] P. Bevilacqua, R. Bruno, N. Arcuri, Green roofs in a Mediterranean climate: energy performances based on in-situ experimental data, *Renew. Energy.* 152 (2020) 1414–1430. doi:10.1016/j.renene.2020.01.085.
- [18] C. Koppe, S. Kovats, G. Jendritzky, B. Menne, Health and global environmental change; heat-waves: risks and responses, series no. 2, energy, environment and sustainable development, Copenhagen, 2004.
- [19] J. Dong, M. Lin, J. Zuo, T. Lin, J. Liu, C. Sun, J. Luo, Quantitative study on the cooling effect of green roofs in a high-density urban Area—A case study of Xiamen, China, *J. Clean. Prod.* 255 (2020) 120152. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120152.
- [20] S. Saiz, C. Kennedy, B. Bass, K. Pressnail, Comparative life cycle assessment of standard and green roofs, *Environ. Sci. Technol.* 40 (2006) 4312–4316.
- [21] L. Kosareo, R. Ries, Comparative environmental life cycle assessment of green roofs, *Build. Environ.* 42 (2007) 2606–2613.
- [22] H. Rumble, P. Finch, A.C. Gange, Green roof soil organisms: Anthropogenic assemblages or natural communities?, *Appl. Soil Ecol.* 126 (2018) 11–20.
- [23] F. Madre, A. Vergnes, N. Machon, P. Clergeau, A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods, *Ecol. Eng.* 57 (2013) 109–117.
- [24] M.V. Sánchez Dominguez, E. González, D. Fabián, A. Salvo, M.S. Fenoglio, Arthropod diversity and ecological processes on green roofs in a semi-rural area of Argentina: Similarity to neighbor ground habitats and landscape effects, *Landsc. Urban Plan.* 199 (2020) 103816. doi:https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103816.
- [25] P. Bevilacqua, D. Mazzeo, N. Arcuri, Thermal inertia assessment of an experimental extensive green roof in summer conditions, *Build. Environ.* 131 (2018) 264–276.
- [26] F. Olivieri, C. Di Perna, M. D’Orazio, L. Olivieri, J. Neila, Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate, *Energy Build.* 63 (2013) 1–14.
- [27] A. Gagliano, M. Detommaso, F. Nocera, G. Evola, A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional

roofs, *Build. Environ.* 90 (2015) 71–81.

- [28] I. Jaffal, S. Ouldboukhitine, R. Belarbi, A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, *Renew. Energy*. 43 (2012) 157–164.
- [29] T.E. Morakinyo, K.W.D. Kalani, C. Dahanayake, E. Ng, C.L. Chow, Temperature and cooling demand reduction by green-roof types in different climates and urban densities: a co-simulation parametric study, *Energy Build.* 145 (2017) 226–237.
- [30] L.L.H. Peng, C.Y. Jim, Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation, *Energies*. 6 (2013) 598–618.
- [31] Y. Wang, F. Bakker, R. de Groot, H. Wörtche, Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment: a literature review, *Build. Environ.* 77 (2014) 88–100.
- [32] M. D’Orazio, C. Di Perna, E. Di Giuseppe, Green roof yearly performance: a case study in a highly insulated building under temperate climate, *Energy Build.* 55 (2012) 439–451.
- [33] C.Y. Jim, L.L.H. Peng, Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof, *Urban For. Urban Green.* 11 (2012) 73–85.
- [34] R. Castiglia-Feitosa, S.J. Wilkinson, Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit, *Build. Environ.* 140 (2018) 11–22.
- [35] M. Shafique, A. Azam, M. Rafiq, M. Ateeq, X. Luo, An overview of life cycle assessment of green roofs, *J. Clean. Prod.* 250 (2020) 119471. doi:10.1016/j.jclepro.2019.119471.
- [36] J.-F. Li, O.W.H. Wai, Y.S. Li, J. -m. Zhan, Y.A. Ho, J. Li, E. Lam, Effect of green roof on ambient CO₂ concentration, *Build. Environ.* 45 (2010) 2644–2651.
- [37] N.H. Wong, Y. Chen, C.L. Ong, A. Sia, Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment, *Build. Environ.* 38 (2003) 261–270.
- [38] X. Zhang, L. Shen, V.W.Y. Tam, W.W.Y. Lee, Barriers to implement extensive green roof systems: A Hong Kong study, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 314–319.
- [39] D.J. Sailor, M. Hagos, An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media, *Energy Build.* 43 (2011) 2298–2303.
- [40] S. Vera, C. Pinto, P.C. Tabares–Velasco, W. Bustamante, A critical review of heat and mass transfer in vegetative roof models used in building energy and urban environment simulation tools, *Appl. Energy*. 232 (2018) 752–764.
- [41] K.L. Getter, D.B. Rowe, J.A. Andresen, I.S. Wichman, Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate, *Energy Build.* 43 (2011) 3548–3557.

- [42] A. Niachou, K. Papakonstantinou, M. Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou, Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance, *Energy Build.* 33 (2001) 719–729.
- [43] E.P. Del Barrio, Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, *Energy Build.* 27 (1998) 179–193.
- [44] D.J. Sailor, A green roof model for building energy simulation programs, *Energy Build.* 40 (2008) 1466–1478.
- [45] G. Heidarinejad, A. Esmaili, Numerical simulation of the dual effect of green roof thermal performance, *Energy Convers. Manag.* 106 (2015) 1418–1425.
- [46] R. Djedjig, S.E. Ouldboukhite, R. Belarbi, E. Bozonnet, Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs, *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 39 (2012) 752–761.
- [47] Y. Tian, X. Bai, B. Qi, L. Sun, Study on heat fluxes of green roofs based on an improved heat and mass transfer model, *Energy Build.* 152 (2017) 175–184.
- [48] C. Arkar, S. Domjan, S. Medved, Heat transfer in a lightweight extensive green roof under water–freezing conditions, *Energy Build.* 167 (2018) 187–199.
- [49] L. Škerget, A. Tadeu, C.A. Brebbia, Transient numerical simulation of coupled heat and moisture flow through a green roof, *Eng. Anal. Bound. Elem.* 95 (2018) 53–68.
- [50] S. Quezada-García, G. Espinosa-Paredes, M.A. Escobedo-Izquierdo, A. Vázquez-Rodríguez, R. Vázquez-Rodríguez, J.J. Ambriz-García, Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems, *Energy Build.* 139 (2017) 205–213.
- [51] S.J. Castiglia Feitosa, R. Wilkinson, Attenuating heat stress through green roof and green wall retrofit, *Build. Environ.* 140 (2018) 11–22.
- [52] J.Q. Zhang, X.P. Fang, H.X. Zhang, W. Yang, C.C. Zhu, A heat balance model for partially vegetated surfaces, *Infrared Phys. Technol.* 38 (1997) 287–294. doi:10.1016/S1350-4495(97)00020-0.
- [53] R. Kumar, S.C. Kaushik, Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings, *Build. Environ.* 40 (2005) 1505–1511.
- [54] S.-E. Ouldboukhite, R. Belarbi, I. Jaffal, A. Trabels, Assessment of green roof thermal behavior: A coupled heat and mass transfer model, *Build. Environ.* 46 (2011) 2624–2631.
- [55] P.C. Tabares-Velasco, J. Srebric, Experimental quantification of heat and mass transfer process through vegetated roof samples in a new laboratory setup, *Int. J. Heat Mass Transf.* 54 (2011) 5149–5162.
- [56] T. Ayata, P.C. Tabares-Velasco, J. Srebric, An investigation of sensible heat fluxes at a green roof in a laboratory setup, *Build. Environ.* 46 (2011) 1851–1861.

- [57] C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy Build.* 42 (2010) 959–965.
- [58] C.Y. Jim, S.W. Tsang, Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs, *Energy Build.* 43 (2011) 1341–1350.
- [59] Q. Meng, W. Hu, Roof cooling effect with humid porous medium, *Energy Build.* 37 (2005) 1–9.
- [60] P.C. Tabares–Velasco, J. Srebric, A heat transfer model for assessment of plant based roofing systems in summer conditions, *Build. Environ.* 49 (2012) 310–323.
- [61] L. Evangelisti, C. Guattari, F. Asdrubali, On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review, *Energy Build.* 183 (2019) 607–625. doi:10.1016/j.enbuild.2018.11.037.
- [62] F.P. Incropera, D.P. Dewitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [63] G.S. Campbell, J.M. Norman, *An introduction to environmental biophysics*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [64] Q.L. Meng, Y. Zang, L. Zang, Measurement of the equivalent thermal resistance of rooftop lawns in a hot-climate wind tunnel, *J. Harbin Inst. Technol. (New Ser.* 13 (2006) 53–56.
- [65] J.W. Deardorff, Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, *J. Geophys. Res.* 83 (1978) 1889–1903.
- [66] R.M. Lazzarin, F. Castellotti, F. Busato, Experimental measurements and numerical modelling of a green roof, *Energy Build.* 37 (2005) 1260–1267.
- [67] B. Wadzuk, D. Schneider, M. Feller, R. Traver, Evapotranspiration from a Green roof storm–water control measure, *J. Irrig. Drain. Eng.* 139 (2013) 995–1003.
- [68] A. Jahanfar, J. Drake, B. Sleep, B. Gharabaghi, A modified FAO evapotranspiration model for refined water budget analysis for Green Roof systems, *Ecol. Eng.* 119 (2018) 45–53.
- [69] S. Cascone, A. Gagliano, T. Poli, G. Sciuto, Thermal performance assessment of extensive green roofs investigating realistic vegetation-substrate configurations, *Build. Simul.* 12 (2019) 79–393.
- [70] S. Cascone, J. Coma, A. Gagliano, G. Pérez, The evapotranspiration process in green roofs: A review, *Build. Environ.* 147 (2019) 337–355.
- [71] S.-E. Ouldboukhitine, R. Belarbi, Experimental characterization of green roof components, *Energy Procedia.* 78 (2015) 1183–1188.
- [72] M.A. Chagolla–Aranda, E. Simá, J. Xamán, G. Álvarez, I. Hernández–Pérez, E. Téllez–Velázquez, Effect of irrigation on the experimental thermal performance of

- agreen roof in a semi-warm climate in Mexico, *Energy Build.* 154 (2017) 232–243.
- [73] S.W. Tsang, C.Y. Jim, Applying artificial intelligence modeling to optimize green roof irrigation, *Energy Build.* 127 (2016) 360–369.
- [74] L. Locatelli, O. Mark, P.S. Mikkelsen, K. Arnbjerg-Nielsen, M.B. Jensen, P.J. Binning, Modelling of green roof hydrological performance for urban drainage applications, *J. Hydrol.* 519 (2014) 3237–3248.
- [75] H. -p. Qin, Y. -n. Peng, Q. -l. Tang, S.-L. Yu, A HYDRUS model for irrigation management of green roofs with a water storage layer, *Ecol. Eng.* 95 (2016) 399–408.
- [76] D. Zirkelbach, S.-R. Mehra, K.-P. Sedlbauer, H.-M. Künzle, B. Stöckl, A hygrothermal green roof model to simulate moisture and energy performance of building components, *Energy Build.* 145 (2017) 79–91.
- [77] R. Hakimdavar, P.J. Culligan, M. Finazzi, S. Barontini, R. Ranzi, Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on observed and modeled green roof hydrologic performance, *Ecol. Eng.* 73 (2014) 494–508.
- [78] K.X. Soulis, J.D. Valiantzas, N. Ntoulas, G. Kargas, P.A. Nektarios, Simulation of green roof runoff under different substrate depths and vegetation covers by coupling a simple conceptual and a physically based hydrological model, *J. Environ. Manage.* 200 (2017) 434–445.
- [79] A. Talebi, S. Bagg, B.E. Sleep, D.M. O’Carroll, Water retention performance of green roof technology: A comparison of canadian climates, *Ecol. Eng.* 126 (2019) 1–15.
- [80] V. Sandoval, F. Suárez, S. Vera, C. Pinto, F. Victorero, C. Bonilla, J. Gironás, W. Bustamante, V. Rojas, P. Pastén, Impact of the properties of a green roof substrate on its hydraulic and thermal behavior, *Energy Procedia.* 78 (2015) 1177–1182.
- [81] S.W. Churchill, H. Ozoe, Correlations for laminar forced convection in flow over an isothermal flat plate and in developing and fully developed flow in an isothermal tube, *J. Heat Transfer.* 95 (1973) 78–84.
- [82] S. Quezada-García, G. Espinosa-Paredes, M.A. Escobedo-Izquierdo, A. Vázquez-Rodríguez, R. Vázquez-Rodríguez, J.J. Ambriz-García, Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems, *Energy Build.* 139 (2017) 205–213.
- [83] N. Gerzhova, J. Cote, P. Blanchet, C. Dagenais, S. Menard, A conceptual framework for modelling the thermal conductivity of dry green roof substrates, *BioResources.* 14 (2019) 8573–8599.
- [84] L. Xing, J.R. Cullin, J.D. Spitler, Modeling of foundation heat exchangers- Comparison of numerical and analytical approaches Article History, *Build. Simul.* 5 (2012) 267–279. doi:10.1007/s12273-012-0088-1.

- [85] G.H. Hargreaves, F. Asce, R.G. Allen, History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation, *J. Irrig. Drain. Eng.* 129 (2003) 53–63. doi:10.1061/ASCE0733-94372003129:153.
- [86] Y. Cengel, M. Boles, *Termodinámica*, Mc Graw Hill, Mexico, 2003.
- [87] M. Tang, X. Zheng, Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days, *Appl. Energy*. 242 (2019) 1010–1021.
- [88] K.-T. Lei, J.-S. Tang, P.-H. Chen, Numerical simulation and experiments with green roofs for increasing indoor thermal comfort, *J. Chinese Inst. Eng.* 42 (2019) 346–356. doi:10.1080/02533839.2019.1585207.
- [89] S. Yuan, D. Rim, Cooling energy saving associated with exterior greenery systems for three US Department of Energy (DOE) standard reference buildings Article History, *Build. Simul.* 11 (2018) 625–631. doi:10.1007/s12273-018-0427-y.
- [90] M. Mungur, Y. Poorun, D. Juggurnath, Y.B. Ruhomally, R. Rughooputh, M.Z. Dauhoo, A. Khoodaruth, H. Shamachurn, M. Gooroochurn, N. Boodia, M. Chooneea, S. Facknath, A numerical and experimental investigation of the effectiveness of green roofs in tropical environments: The case study of Mauritius in mid and late winter, *Energy*. 202 (2020) 117608.
- [91] A. Ávila-Hernández, E. Simá, J. Xamán, I. Hernández-Pérez, E. Téllez-Velázquez, M.A. Chagolla-Aranda, Test box experiment and simulations of a green-roof: Thermal and energy performance of a residential building standard for Mexico, *Energy Build.* 209 (2020) 109709. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109709.
- [92] F. Ascione, Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling, *Sol. Energy*. 154 (2017) 34–100. doi:10.1016/J.SOLENER.2017.01.022.
- [93] S. Parizotto, R. Lamberts, Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil, *Energy Build.* 43 (2011) 1712–1722.
- [94] P. La Roche, U. Berardi, Comfort and energy savings with active green roofs, *Energy Build.* 82 (2014) 492–504.
- [95] R. Reyes, W. Bustamante, J. Gironás, P.A. Pasténa, V. Rojas, F. Suárez, S. Vera, F. Victorero, C.A. Bonilla, Effect of substrate depth and roof layers on green roof temperature and water requirements in a semi-arid climate, *Ecol. Eng.* 97 (2016) 624–632.
- [96] H.F. Castleton, V. Stovin, S.B.M. Beck, J.B. Davison, Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, *Energy Build.* 42 (2010) 1582–1591.
- [97] I. Ziogou, A. Michopoulos, V. Voulgari, T. Zachariadis, Implementation of green roof technology in residential buildings and neighborhoods of Cyprus, *Sustain. Cities Soc.* 40 (2018) 233–243.

- [98] X. Chen, C. Shuai, Z. Chen, Y. Zhang, What are the root causes hindering the implementation of green roofs in urban China?, *Sci. Total Environ.* 654 (2019) 742–750.