

Efecto térmico de las azoteas verdes en la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila

M. Azucena Escobedo Izquierdo^A, Sergio Quezada García^A,
Ricardo I. Cázeres Ramírez^B, Marco Antonio Polo Labarrios^A,
Heriberto Sánchez Mora^{C,*}

^AUniversidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Ciudad de México.

^BUniversidad Autónoma Metropolitana–Iztapalapa, Ciudad de México, México.

^CInstituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Ciudad de México.

heribertosanchez7@hotmail.com, tikenbell@yahoo.com.mx, sergio.quezada@ingenieria.unam.mx,
ricardo-cazares@hotmail.com, antonio.polo@cnsns.gob.mx

RESUMEN

En este trabajo, se presenta un modelo matemático de transferencia de calor para evaluar el efecto térmico de la implementación de azoteas verdes extensivas para la rehabilitación de edificaciones mal aisladas sometidas a las condiciones climáticas de la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila. El modelo, que requiere pocos datos de entrada, es resuelto numéricamente e implementado en Python. Los resultados muestran que la implementación de una azotea verde contribuye a disminuir la amplitud de oscilación en la temperatura interna de la edificación, disminuye la temperatura media interior, y reduce el consumo de energía eléctrica destinada al acondicionamiento de aire.

PALABRAS CLAVE

Transferencia de calor; ahorro de energía; aire acondicionado; modelo matemático; azotea convencional.

ABSTRACT

In this work, a mathematical heat transfer model is presented to evaluate the thermal effect of the implementation of extensive green roofs for the rehabilitation of poorly insulated buildings subjected to the climatic conditions of Mexico City, Yucatan and Coahuila. The model, which requires a few amounts of input data, is solved numerically and implemented in Python. The results show that the implementation of a green roof contributes to decrease the amplitude of internal temperature oscillation of the building, decreases the average indoor temperature and reduces the consumption of electrical energy for air conditioning.

KEYWORDS

Heat transfer; energy saving; air conditioning; mathematical model; conventional roof.

INTRODUCCIÓN

Algunos impactos negativos al ambiente atribuibles a las actividades humanas son: la pérdida de biodiversidad, el deterioro de los ecosistemas, el agotamiento de los recursos naturales, la lluvia ácida, la contaminación atmosférica, el deterioro de la capa de ozono y el cambio climático. Las estrategias sostenibles se han convertido en el principal medio para mitigar estos impactos.

Una estrategia sostenible para la adaptación de las ciudades al cambio climático es la implantación de cubiertas verdes en las envolventes de los edificios,¹ es decir, azoteas y paredes verdes. Las azoteas verdes son pequeños ecosistemas con poca profundidad de sustrato y bajos requerimientos de agua que pueden considerarse como islas verdes integradas en el paisaje urbano.² Estos ecosistemas

sustituyen las superficies convencionales de las azoteas por plantas, creando un entorno natural con beneficios, especialmente a nivel energético.³

Algunos beneficios de las cubiertas verdes son: aumento de la superficie forestal urbana,⁴ purificación del aire,⁵ reducción del efecto isla urbana de calor,⁶ preservación de la biodiversidad,⁷ reducción de la escorrentía⁸ y ahorro energético en la edificación por climatización.^{6,9,10}

Las azoteas verdes pueden desempeñar un papel importante en el aumento de los espacios verdes en zonas urbanas densamente pobladas.⁴ Suszanowicz⁵ demostró con modelos experimentales, que las azoteas verdes tienen un efecto beneficioso en la eliminación de contaminantes atmosféricos. Berardi,⁶ demostró que las azoteas verdes tienen un efecto de enfriamiento de la temperatura del aire a nivel de los peatones, de hasta 0.4 °C durante el día, lo que contribuye a la mitigación del efecto de isla urbana de calor. Sánchez Domínguez *et al.*,⁷ realizaron un estudio para una zona semirural de Córdoba, Argentina, y encontraron una gran diversidad de artrópodos en las cubiertas vivas, con casi 400 especies diferentes. Yao *et al.*⁸ demostraron a través de simulación, que el reverdecimiento de las superficies de las azoteas proporciona beneficios en la regulación de las aguas pluviales.

Berardi⁶ concluyó que la implantación de una azotea verde permite reducir la demanda energética de los edificios en un 3% durante el verano en Toronto, Canadá. Bevilacqua *et al.*⁹ demostraron mediante simulación, que una azotea verde proporciona una reducción significativa de la demanda de energía para refrigeración, con un ahorro anual del 34.9%, para un clima mediterráneo. Susca¹⁰ concluyó que la implementación de azoteas verdes reduce eficientemente la demanda de energía entre el 10% y el 75%, dependiendo de la zona climática, el tipo de edificio y la composición de la azotea.

A pesar de los múltiples beneficios de las azoteas verdes, un obstáculo para su implantación es su costo de inversión, que es entre 3 y 6 veces más elevado que el de las azoteas convencionales.^{11,12} Sin embargo, una comprensión completa de su valor económico puede ayudar a fomentar su implementación.¹³ Para tener un conocimiento más amplio de su valor económico, es necesario evaluar su efecto térmico, por lo que es imprescindible conocer los flujos de calor y masa implicados.¹⁴

Para cuantificar los beneficios energéticos se necesitan evaluaciones experimentales y/o simulaciones.¹⁵ Las condiciones ambientales intermitentes complican las evaluaciones experimentales para evaluar el efecto térmico de las azoteas verdes en una edificación antes y después de su implementación. Por otra parte, las azoteas verdes son sistemas complejos para modelar los fenómenos de transferencia de calor y masa adicionalmente, existe una amplia variación en la composición de las capas que las integran. Por estas razones, los modelos matemáticos más avanzados tienen la limitación de la gran cantidad de datos de entrada necesarios para su ejecución, datos que rara vez están disponibles en la práctica.¹⁵

En los últimos años se han llevado a cabo varios estudios sobre el ahorro energético debido a la implantación de azoteas verdes. Sin embargo, la literatura existente muestra una gran variedad de resultados, por lo que se necesitan estudios detallados para cada caso específico.⁶ En este trabajo se evalúan los efectos energéticos de las azoteas verdes extensivas para la rehabilitación de edificios mal aislados sometidos a las condiciones climáticas en verano de 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°). Adicionalmente, se busca reducir el número de variables y parámetros necesarios para el modelo matemático. Esto se debe a que los modelos matemáticos actuales requieren de un gran número de variables y parámetros de entrada, los cuales son de difícil acceso para los usuarios ya que su obtención requiere de conocimientos técnicos e instrumentación costosa.

MODELO MATEMÁTICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR

Una azotea verde se compone generalmente de la estructura del edificio, una membrana impermeable cubierta con sustrato y plantas. Las azoteas verdes se dividen en extensivas (profundidad del sustrato de unos 10 cm), semi-intensivas (profundidad del sustrato de unos 25 cm) e intensivas (profundidad del sustrato de unos 35 cm).¹⁶ Las azoteas verdes extensivas suelen tener como vegetación suculenta, césped y musgo; por lo que en la mayoría de los casos no necesitan

mantenimiento.⁴ En este estudio, se evalúa el efecto térmico de las azoteas verdes extensivas porque encajan perfectamente en los casos de rehabilitación de edificios mal aislados.¹⁷

Modelo de transferencia de calor para elementos envolventes

El modelo matemático de transferencia de calor para los elementos constructivos convencionales considera la conducción de calor unidimensional a través de la azotea y las paredes estos elementos están constituidos por un solo material opaco uniforme, es decir, no se consideran ventanas ni tragaluces. La azotea convencional es de concreto, que es el material comúnmente utilizado en la construcción de viviendas en México. Los flujos de calor presentes en una azotea convencional se muestran en la figura 1a. Tanto las paredes como la azotea están formadas por diferentes capas de materiales, sin embargo, en este estudio sólo se considera la capa de concreto porque el espesor de las otras capas es muy delgado y por lo tanto despreciable.

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

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

donde ρ es la densidad, C_p es el calor específico, T es la temperatura de la envolvente, t es el tiempo, k es la conductividad térmica y x es la dirección de la transferencia de calor por conducción.

La condición inicial está dada por:

$$T(t, x) = T_0(x) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (2)$$

La condición de frontera fuera del edificio ($x=0$) está dada por:

$$-k \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = q_{sr} - q_{em} - q_{cv} \quad (3)$$

donde q_{sr} es el flujo de calor debido a la radiación solar, q_{em} es el flujo de calor neto por emisión y q_{cv} es el flujo de calor debido a la convección. Estos flujos de calor se calculan a partir de:

$$q_{sr} = \alpha q_{sri} \quad (4)$$

$$q_{em} = \varepsilon \sigma \left(T^4 \Big|_{x=0} - T_e^4 \right) \quad (5)$$

$$q_{cv} = h \left(T \Big|_{x=0} - T_a \right) \quad (6)$$

donde $T \Big|_{x=0}$ es la temperatura de la superficie exterior (ya sea de la pared o de la azotea), α es la absorptancia de la superficie exterior, q_{sri} es la radiación solar incidente, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T_a es la temperatura del aire exterior, T_e es la temperatura del entorno o alrededores y h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, que es calculado en función del número de Nusselt:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (7)$$

donde L es la longitud de la envolvente paralela al flujo de aire. El número de Nusselt para paredes planas está dado por:¹⁸

$$Nu = \frac{0.3387 Pr^{1/3} Re^{1/2}}{\left(1 + \left(\frac{0.0468}{Pr} \right)^{2/3} \right)^{1/4}} \quad (8)$$

donde Re es el número de Reynolds y Pr es el número de Prandtl, dados por:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (9)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (10)$$

donde v es la velocidad media del viento y μ es la viscosidad dinámica del aire.

La condición de frontera para el interior está dada por:

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=\gamma} = h_{in} (T|_{x=\gamma} - T_{in}) \quad (11)$$

donde T se evalúa en la superficie interior (pared o azotea), γ es el espesor de la envolvente, T_{in} es la temperatura del aire contenido en el interior y h_{in} es el coeficiente combinado de transferencia de calor en el interior, el cual considera la transferencia de calor por convección y radiación. Las condiciones de frontera, para la azotea, se ilustran en la figura 1b. Este modelo se utiliza para cada una de las envolventes de la edificación.

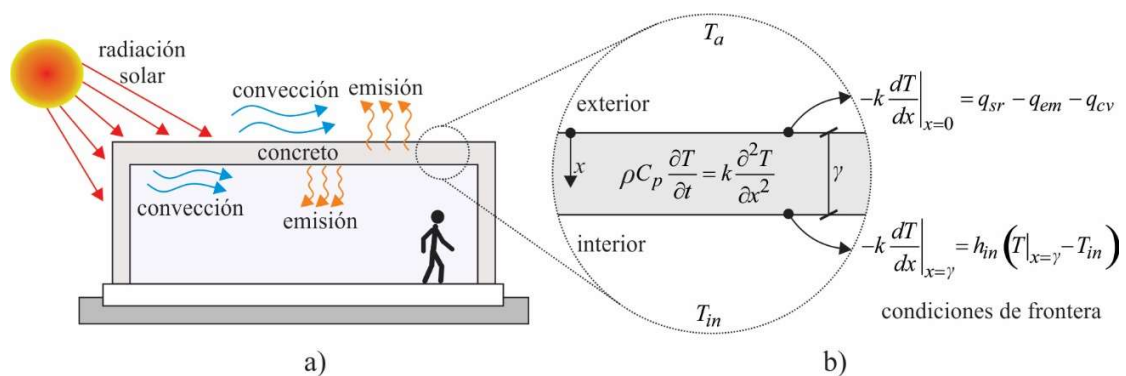


Fig. 1. Edificación con azotea convencional a) Flujos de calor, b) Condiciones de frontera en el interior y exterior de la edificación.

Balance de energía para el interior de la edificación

El cambio temporal de temperatura en el interior de la edificación, sin transferencia de masa, está dado por:

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} \quad (12)$$

donde m es la masa de aire contenida en el interior de la edificación y \dot{Q} es el calor total transferido al interior a través de los elementos envolventes, dado por:

$$\dot{Q} = \sum h_{in} (T_i - T_{in}) A_i + \sum \dot{S}_k - \dot{Q}_c \quad (13)$$

donde T_i y A_i son la temperatura de la superficie y el área del elemento envolvente i , respectivamente; mientras que \dot{S} es la fuente interna de calor k , la cual puede ser una persona o un dispositivo eléctrico disipando calor y \dot{Q}_c es el calor removido por el efecto de refrigeración de un sistema de aire acondicionado.

Para resolver la Ec. (12), la condición inicial está dada por:

$$T_{in} = T_{in,0} \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (14)$$

Modelo matemático de transferencia de calor para la azotea verde extensiva

El modelo conceptual de una azotea verde se muestra en la figura 2a, donde se pueden ver los flujos de calor a través de las diferentes capas que la integran.

El calor transferido por conducción a través de la capa verde, formada por las plantas y el aire, está dado por una ecuación efectiva del sistema poroso formado por la fase sólida (plantas) y gaseosa (aire):

$$(\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} \quad (15)$$

donde T_g es la temperatura de la capa verde, $(\rho C_p)_g$ y k_g son propiedades efectivas de la capa verde que se obtienen a partir de:¹⁹

$$(\rho C_p)_{ef} = (\rho C_p)_1(1-\beta) + (\rho C_p)_2\beta \quad (16)$$

$$k_{ef} = k_1(1-\beta) + k_2\beta \quad (17)$$

donde el subíndice *ef* se refiere a una propiedad efectiva, los subíndices 1 y 2 se refieren al componente (planta y aire para la capa verde; suelo y agua para la capa de sustrato) y β es la fracción volumen ocupada por el componente 1 en el volumen total de la capa, es decir:

$$\beta = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (18)$$

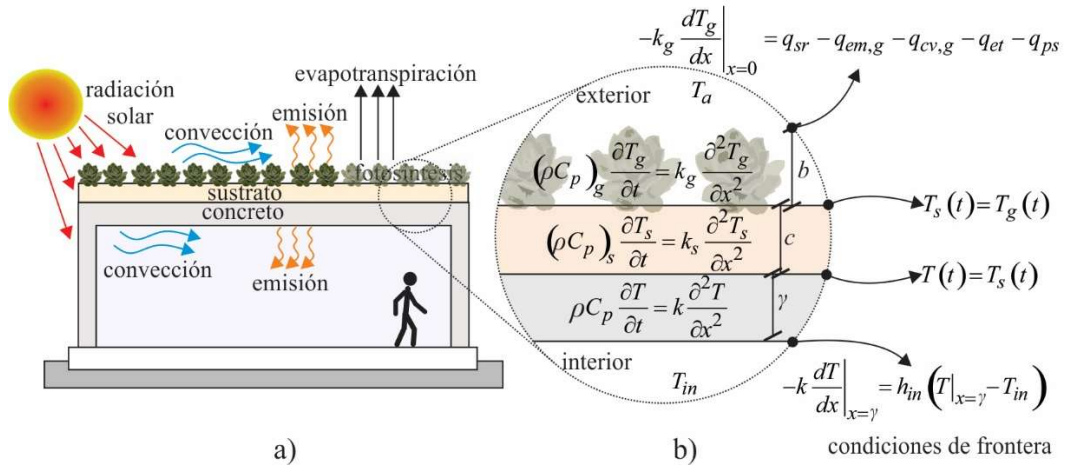


Fig. 2. Edificación con azotea verde a) flujos de calor, b) condiciones de frontera en el interior y exterior de la edificación.

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

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (19)$$

donde T_s es la temperatura del sustrato, $(\rho C_p)_s$ y k_s son propiedades efectivas para la capa de sustrato y se calculan de la misma manera que las propiedades efectivas de la capa verde, es decir, mediante las Ecs. (16) – (18).

La Ec. (19) toma en cuenta la porosidad del sustrato debido a que se ha demostrado, mediante experimentos y simulación numérica, que la conductividad térmica depende de la porosidad y de las propiedades térmicas de los componentes minerales del sustrato.²⁰

Las condiciones iniciales para las Ecs. (15) y (19) están dadas por:

$$T_g(0, x) = T_{g,0}(x) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (20)$$

$$T_s(0, x) = T_{s,0}(x) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (21)$$

Las Ecs. (15) y (19) se relacionan mediante la siguiente condición de frontera (véase la figura 2b):

$$T_s(t) = T_g(t) \quad \text{en} \quad x = b \quad (22)$$

donde b es el espesor de la capa verde. Las Ecs. (19) y (1) se relacionan con la condición de frontera:

$$T(t) = T_s(t) \quad \text{en} \quad x = b + c \quad (23)$$

donde c es el espesor de la capa de sustrato. La condición de frontera para la Ec. (15) fuera del edificio ($x=0$) está dada por:

$$-k_g \frac{dT_g}{dx} \Big|_{x=0} = q_{sr} - q_{em,g} - q_{cv,g} - q_{et} - q_{ps} \quad (24)$$

donde q_{et} es el calor transferido por evapotranspiración al ambiente y q_{ps} es el calor neto requerido por las plantas para la fotosíntesis y la respiración calculado por la correlación:²¹

$$q_{ps} = \frac{6.5}{TC(1 + R_{ep}/R_{tp})} q_{et} \quad (25)$$

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 $TC=20$.

La pérdida de calor por evapotranspiración está dada por:²¹

$$q_{et} = \lambda R_{et} \quad (26)$$

donde λ es el calor latente de vaporización y R_{et} es la tasa de evapotranspiración.

La evapotranspiración es una combinación del fenómeno de transpiración de agua por parte de las plantas durante su crecimiento o retenida en el tejido vegetal y el fenómeno de evaporación de la humedad del sustrato y la vegetación.²² Estos fenómenos están en función principalmente de la radiación solar que llega a la superficie del sustrato, ya que proporciona la energía necesaria.

La evapotranspiración puede calcularse mediante la ecuación de Hargreaves:²³

$$ET_0 = 0.0023 q_{sri} (T_a - 255.35) T_R^{0.5} \quad (27)$$

donde T_R es la diferencia entre la temperatura ambiente máxima y mínima alcanzada durante el día, dicho de otro modo:

$$T_R = T_{\max} - T_{\min} \quad (28)$$

por lo que R_{et} está dado por:

$$R_{et} = e_f ET_0 \quad (29)$$

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 calor transferido por convección desde la capa verde al exterior se calcula mediante la correlación:²⁴

$$q_{cv,g} = (5.7 + 3.8v)(T_g - T_a) \quad (30)$$

El intercambio de calor entre la capa verde y el entorno a través de la emisión está dado por:

$$q_{em,g} = \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (31)$$

donde T_{sky} es la temperatura cielo. En este estudio, T_{sky} se determina a partir de la norma ISO 13790:²⁵

$$T_{sky} = T_a - 13 \text{ K} \quad (32)$$

Sistema de aire acondicionado

Para determinar el consumo de energía eléctrica debido al uso del aire acondicionado, se utiliza el coeficiente de rendimiento (COP), que está dado por:²⁶

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (33)$$

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

$$E_{ac} = \dot{W} t_{ac} \quad (34)$$

donde t_{ac} es el tiempo de funcionamiento del sistema de aire acondicionado. Para este estudio se considera que el $COP=5.0$, $\dot{Q}_c=7$ kW (para garantizar alcanzar y mantener la temperatura de confort en los casos de estudio) y que el sistema de aire acondicionado tiene un control de encendido y apagado donde:

$$\begin{aligned} T_{in} > 297.15 \text{ K} &\rightarrow \text{on} && \text{(sistema encendido)} \\ T_{in} < 293.15 \text{ K} &\rightarrow \text{off} && \text{(sistema apagado)} \end{aligned} \quad (35)$$

Solución numérica

Las ecuaciones diferenciales se resuelven numéricamente por el método de las diferencias finitas en esquema explícito. Las ecuaciones (1), (15) y (19) pueden escribirse como:

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (36)$$

La forma discreta de la expresión anterior es:

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \frac{k_{ef}}{(\rho C_p)_{ef}} (T_{j+1}^t - 2T_j^t + T_{j-1}^t) \quad (37)$$

Las condiciones de frontera (Ecs. (3), (11) y (24)) pueden escribirse como

$$-k \frac{dT}{dx} = \sum q_m \quad (38)$$

donde q_m es el m -ésimo flujo de calor, la forma discreta de la Ec. (38) está dada por:

$$T_{j+1} = T_j - \frac{\Delta x}{k} \sum q_m \quad (39)$$

mientras que la Ec. (12) tiene la siguiente forma discreta:

$$T_{in}^{t+\Delta t} = T_{in}^t + \Delta t \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} \quad (40)$$

La solución numérica de los modelos matemáticos de transferencia de calor para las envolventes de concreto y la azotea verde se implementa en Python 3.6.3. El tamaño del paso del tiempo es $\Delta t=1.2$ s, mientras que el tamaño de paso espacial para las envolventes es $\Delta x=0.01$ m y para la azotea verde es de $\Delta x=0.03$ m.

VALIDACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Feng *et al.*²¹ presentan los valores de radiación solar, temperatura de bulbo seco, punto de rocío y velocidad del viento. Estos datos se utilizan en el presente estudio para la validación del modelo propuesto. Las propiedades de los materiales de las azoteas verdes se indican en la tabla I. Los valores paramétricos utilizados para la validación del modelo se indican en la tabla II. Los datos meteorológicos se muestran en la figura 3, se obtuvieron el 21 de julio de 2009 a partir de las 9:00 am en la ciudad de Guangzhou, China.²¹

Tabla I. Propiedades de los materiales que integran la azotea verde.

Propiedad	Plantas	Tierra	Concreto	Aire	Agua
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

Tabla II. Valores paramétricos para la validación del modelo matemático.

Parámetro	Valor	Unidades
a^*	0.85	Adimensional
ε^*	1.0	Adimensional
TC^*	20	Adimensional
R_{ep}/R_{tp}^*	1.0	Adimensional
β_w	0.24	Adimensional
β_a	0.50	Adimensional
λ	2430000	J kg ⁻¹
σ	5.67×10^{-8}	W m ⁻² K ⁻⁴
T_{in}^*	299.15	K
Espesor de la capa verde	0.06	m
Espesor de la capa de sustrato	0.09	m
Espesor del concreto	0.15	m

* Datos obtenidos de.²¹

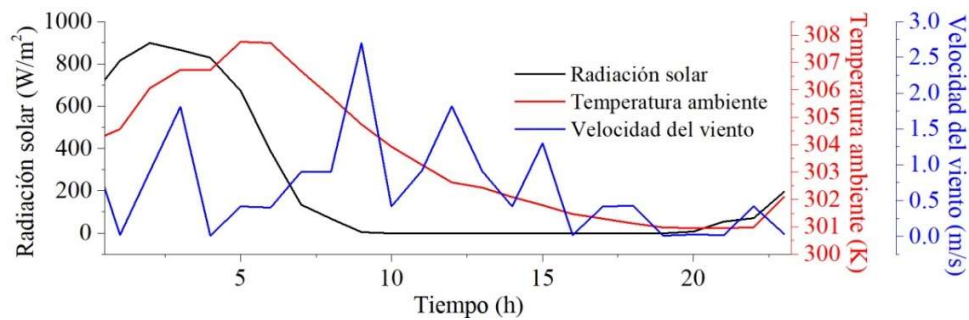


Fig. 3. Datos meteorológicos de 24 horas en Guangzhou, China (fijando las 9:00 AM del 21 de julio de 2009 como hora. Basado en datos de).²¹

Para validar el modelo, la temperatura de la capa verde se compara con la temperatura de la planta de los datos reportados por Feng *et al.*²¹ La figura 4 muestra el diagrama de dispersión de los resultados simulados y los datos de Feng *et al.*²¹ estos tienen una alta correlación estadística ($R^2=0.9588$), esto demuestra la validez del modelo propuesto en este trabajo.

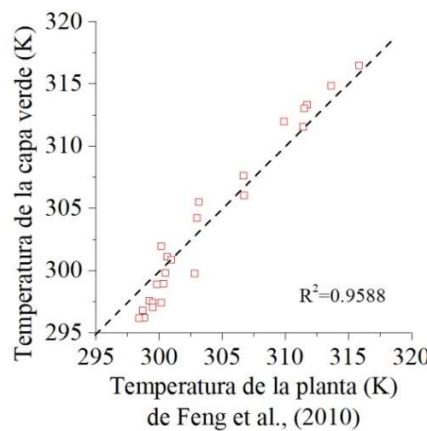


Fig. 4. Validación del modelo matemático.

CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se evalúan los efectos térmicos de las azoteas verdes extensivas para una edificación mal aislada sometida a las condiciones climáticas en verano de tres diferentes regiones de México: las primeras condiciones climáticas corresponden a la Ciudad de México, que tiene un clima cálido subhúmedo, las siguientes condiciones climáticas corresponden a Yucatán con un clima cálido subhúmedo y finalmente se toman las condiciones climáticas de Coahuila donde el clima es cálido y seco.

Para los tres casos de estudio las simulaciones se realizan para una edificación de un solo piso, debido a que el ahorro de energía resulta ser mayor y por lo tanto, más notorio en estructuras de un solo piso.²⁷ Se considera una edificación de 4 m de longitud, 4 m de ancho y una altura de 3 m, cuyas envolventes son cuerpos grises de concreto con un espesor de 15 cm. La edificación se considera como un sistema cerrado, es decir se desprecia el intercambio de materia a través de las ventanas.

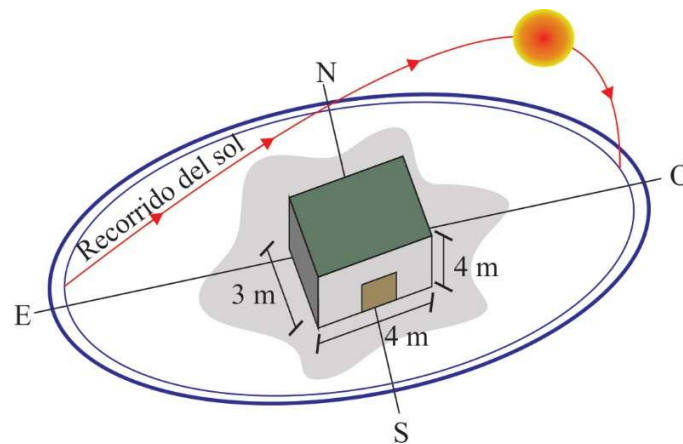


Fig. 5. Recorrido solar con respecto a la edificación durante un día.

La edificación recibe radiación solar a través de dos paredes laterales y la azotea, como se muestra en la figura 5. Una pared recibe radiación solar durante la mañana, mientras que la pared opuesta recibe radiación solar durante la tarde. Para este estudio se considera que las otras dos paredes laterales no reciben radiación solar y se desestiman los efectos de sombreado. Para realizar el estudio se han utilizado las condiciones meteorológicas registradas durante una semana para cada ciudad. Los datos son extraídos de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) de la Comisión Nacional del Agua.²⁸ Los datos se reportan en las figuras 6 – 8, éstos se toman cada 10 minutos, en este trabajo se obtiene un promedio por hora.

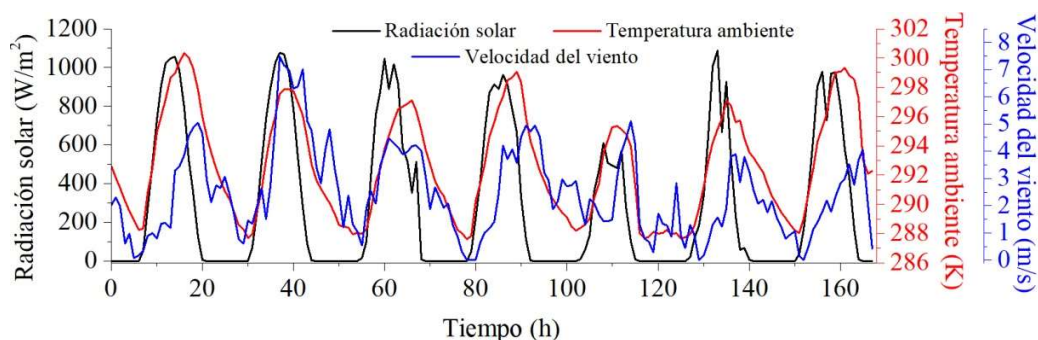


Fig. 6. Datos meteorológicos, de una semana, de la Ciudad de México (con las 00:00 AM del 8 de julio de 2019 como hora 0).²⁸

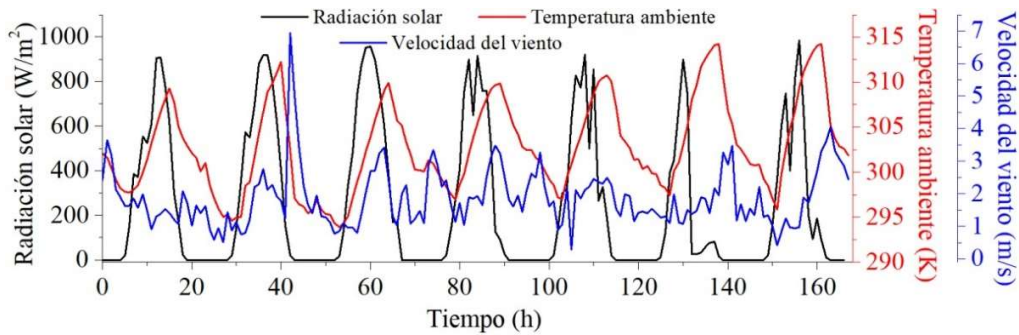


Fig. 7. Datos meteorológicos, de una semana, de Yucatán (con las 00:00 AM del 8 de julio de 2019 como hora 0).²⁸

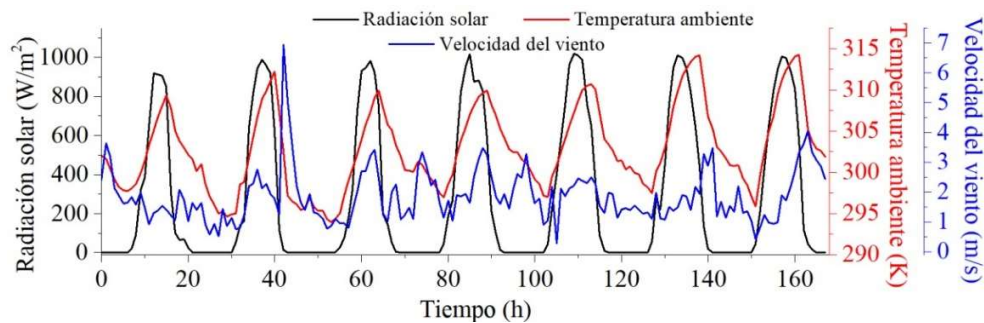


Fig. 8. Datos meteorológicos, de una semana, de Coahuila (con las 00:00 AM del 8 de julio de 2019 como hora 0).²⁸

RESULTADOS

Temperatura interna de la edificación

Los resultados de las simulaciones realizadas para las condiciones climáticas de la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila se enlistan en la tabla III, donde se reportan los valores máximos y mínimos de temperatura interior obtenidos para una semana de simulación, la amplitud de la oscilación y la temperatura media interior. Para estos tres casos no se simula el sistema de aire acondicionado, esto con el objetivo de observar el efecto de las azoteas verdes en la temperatura interior de la edificación. En los tres casos las azoteas verdes contribuyen a reducir la amplitud de oscilación de la temperatura interior de la edificación; también contribuyen a disminuir la temperatura media interior.

Tabla III. Resumen de las temperaturas obtenidas para la azotea convencional y la azotea verde situadas en diferentes ciudades.

Ciudad	Tipo de azotea	Temperatura (K)			
		Interior		Amplitud	Media
		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

Las azoteas verdes pueden ayudar a reducir la amplitud de oscilación de la temperatura interior hasta 15 K (Ciudad de México). La temperatura máxima interior del edificio puede reducirse hasta 13 K (Ciudad de México y Coahuila). Mientras que la temperatura media interior puede reducirse hasta 4 K (Ciudad de México y Coahuila).

Índices para la evaluación del rendimiento térmico

Resistencia térmica equivalente

La resistencia térmica equivalente se utiliza para evaluar la capacidad aislante de las azoteas convencionales y las azoteas verdes:

$$R_{TE} = \frac{T_{s,ex} - T_{s,in}}{q_{md}} \quad (42)$$

donde q_{md} es el flujo de calor medio transferido a través de la azotea al interior del edificio, $T_{s,ex}$ y $T_{s,in}$ son la temperatura media de la superficie exterior e interior de la azotea, respectivamente.

La resistencia térmica equivalente para los tres casos de estudio es de $0.1875 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ para la azotea convencional, mientras que para la azotea verde es de $0.3750 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$.

Factor de decrecimiento equivalente

El factor de decrecimiento equivalente se utiliza para caracterizar la capacidad de la envolvente de la edificación para resistir las fluctuaciones periódicas del clima. Un valor de este factor cercano a cero indica que la envolvente tiene una mayor capacidad para reducir las fluctuaciones periódicas del clima. Se define como la relación entre las amplitudes máximas diarias de las fluctuaciones de temperatura interior y exterior:¹⁴

$$f = \frac{A_{in}}{A_{ex}} \quad (43)$$

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

La tabla IV muestra los valores del factor de decrecimiento diario equivalente obtenidos para los tres casos de estudio.

Día	Ciudad de México		Yucatán		Coahuila	
	convencional	verde	convencional	verde	convencional	verde
1	0.5312	0.2215	0.5167	0.3216	0.5042	0.2443
2	0.5263	0.199	0.5294	0.2632	0.5178	0.2402
3	0.5022	0.2182	0.5329	0.289	0.5151	0.277
4	0.5347	0.1905	0.4985	0.2302	0.4993	0.2698
5	0.4613	0.2177	0.4723	0.2521	0.5177	0.2362
6	0.4525	0.1809	0.3784	0.2443	0.5246	0.3217
7	0.5314	0.2349	0.454	0.2316	0.5336	0.2397
Media	0.5057	0.2090	0.4832	0.2617	0.5160	0.2613

Según los resultados obtenidos del factor de decrecimiento equivalente, la azotea verde tiene una mayor capacidad para soportar las fluctuaciones periódicas del clima en los tres casos de estudio.

Factor de climatización

En este trabajo se propone el factor de climatización para determinar el efecto de la implementación de una azotea verde en la cantidad de energía necesaria para alcanzar la temperatura de confort en el interior de la edificación:

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{in,i} - T_{confort}|}{nT_{confort}} \quad (44)$$

donde n es el número de datos, para este trabajo $n = 24$ por día. Un valor alto del factor de climatización indica que para alcanzar la temperatura de confort es necesario consumir una mayor cantidad de energía. El valor ideal del factor de climatización es cero, lo cual indica que no se requiere ningún sistema de climatización para alcanzar la temperatura de confort térmico.

De acuerdo con los resultados del factor de climatización, mostrados en la tabla V, la instalación de una azotea verde reduce el consumo de energía para la climatización. En la Ciudad de México es donde se requiere la menor cantidad de energía para alcanzar la temperatura de confort. Coahuila es donde se requiere la mayor cantidad de energía para alcanzar la temperatura de confort. Analizando los factores promedio de climatización, de las edificaciones con azotea convencional y azotea verde, se observa que la Ciudad de México tiene el mayor ahorro de energía por la instalación de la azotea verde, seguida de Coahuila.

Tabla V. Valores del factor de climatización diario, f_c , para los tres casos de estudio.

Día	Ciudad de México		Yucatán		Coahuila	
	convencional	verde	convencional	verde	Convencional	verde
1	0.0277	0.0093	0.0406	0.0321	0.0325	0.0251
2	0.0268	0.0081	0.046	0.0369	0.0333	0.0244
3	0.0258	0.0085	0.0471	0.0368	0.0315	0.0212
4	0.0266	0.0083	0.044	0.0362	0.042	0.0303
5	0.0135	0.0061	0.0426	0.0358	0.0466	0.0345
6	0.0235	0.0106	0.0271	0.0268	0.0488	0.0369
7	0.0276	0.0098	0.0282	0.0211	0.05	0.0379
Media	0.0245	0.0087	0.0394	0.0322	0.0407	0.0300

Ahorro de energía

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas considerando que ambas edificaciones tienen instalado un sistema de aire acondicionado con control on/off. La demanda de refrigeración se establece como parámetro para comparar los dos tipos de azoteas.

Tabla VI. Ahorro de energía debido a la implementación de una azotea verde.

Ciudad	Tipo de azotea	Consumo de energía (kWh/semana)	Energía ahorrada con la azotea verde	
			(kWh/semana)	%
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		

En la tabla VI se reporta el ahorro de energía debido a la implementación de la azotea verde, para cada caso de estudio. En Yucatán se ahorra casi el 25% de la energía, mientras que en Coahuila es posible ahorrar alrededor del 33%, en la Ciudad de México se puede ahorrar poco más del 85% de la energía consumida por un sistema de aire acondicionado. Estos resultados son consistentes con los valores obtenidos del factor de climatización.

DISCUSIÓN

El estudio del efecto térmico de las azoteas verdes extensivas ha demostrado que su implementación reduce considerablemente la amplitud de oscilación de la temperatura interior de las edificaciones sometidas a condiciones climáticas de la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila. Adicionalmente se demostró, para estas tres ciudades, que las azoteas verdes reducen el consumo de energía eléctrica para el enfriamiento de la edificación.

Estos resultados son consistentes con los encontrados en otros estudios, e.g., Mungur *et al.*²⁹ concluyeron que las azoteas verdes reducen las fluctuaciones de la temperatura interior; por su parte, Chagolla-Aranda *et al.*³⁰ encontraron, para un clima semicálido de México, que las azoteas verdes tienen un consumo eléctrico menor en un 10.3%; Ávila-Hernández *et al.*³¹ demostraron que en localidades con clima cálido las azoteas verdes reducen la temperatura interior de la edificación hasta 4.7°C, mientras que, en localidades con clima templado, éstas reducen la demanda de energía de refrigeración hasta en un 99%.

Dado que este estudio supone la implantación de azoteas verdes extensivas para la rehabilitación de edificios mal aislados, los resultados obtenidos se consideraron satisfactorios y motivadores para la adopción de esta tecnología.

Como se puede observar en la literatura existente, hay una gran variedad de resultados en cuanto al ahorro de energía para refrigeración. Por ello, es necesario realizar estudios para diferentes zonas climáticas donde se consideren factores como los materiales de construcción y la composición de la azotea verde.

El ahorro energético no solo es consecuencia de un mejor aislamiento térmico de las azoteas verdes, sino también de la mitigación de la temperatura del microclima local.⁶

La falta de promoción e incentivos gubernamentales, así como el aumento de los costos de mantenimiento, diseño y construcción, se identifican como las principales barreras para la implantación de las azoteas verdes.³²

La modelización de las azoteas verdes puede ser útil para que residentes, constructores, arquitectos, ingenieros y responsables políticos comprendan mejor el potencial de esta tecnología

para reducir el consumo de energía. Así, la modelización y la simulación pueden ser útiles para proponer normas o políticas que fomenten la adopción de esta tecnología. Sin embargo, normalmente los modelos matemáticos adoptados para la simulación de las azoteas verdes requieren el conocimiento de varios parámetros, difíciles de medir, para definir adecuadamente los intercambios térmicos con el entorno exterior.⁹ En el presente trabajo se ha realizado un esfuerzo para simplificar el número de parámetros de entrada y además que éstos sean fácilmente accesibles.

CONCLUSIONES

Se examinan los efectos térmicos de las azoteas verdes extensivas sometidas a condiciones climáticas en verano de 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°), para la rehabilitación de edificaciones mal aisladas. Para evaluar este efecto térmico se realiza una comparación de la edificación con azotea de convencional y la edificación con azotea verde. Los datos de entrada al modelo matemático son la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura ambiente; estos datos son fácilmente accesibles ya que son medidos por cualquier instalación meteorológica. No se ha encontrado en la literatura un modelo matemático que requiera tan pocos datos de entrada.

Los resultados obtenidos para los tres casos de estudio muestran que la amplitud de oscilación de la temperatura interior de la edificación es menor cuando ésta tiene una azotea verde. Las azoteas verdes ayudan a reducir la amplitud de oscilación de la temperatura interior hasta 15 K. La temperatura interior máxima de la edificación se redujo hasta 13 K. Además los resultados muestran que las azoteas verdes contribuyen al ahorro de energía, ya que su instalación reduce su consumo hasta en 85%. Esto demuestra que las azoteas verdes proporcionan un importante efecto de refrigeración durante el verano en regiones geográficas con clima cálido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo de la UNAM a través del proyecto PAPIIT – IA103321.

REFERENCIAS

1. L.F. Møller Francis, M. Bergen Jensen, Benefits of green roofs: A systematic review of the evidence for three ecosystem services, *Urban For. Urban Green*. 28 (2017) 167–176.
2. L. Blank, A. Vasl, B.Y. Schindler, G.J. Kadas, L. Blaustein, Horizontal and vertical island biogeography of arthropods on green roofs: a review, *Urban Ecosyst*. 20 (2017) 911–917. doi:10.1007/s11252-016-0639-9.
3. A. Mohajerani, J. Bakaric, T. Jeffrey-Bailey, The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete, *J. Environ. Manage*. 197 (2017) 522–538.
4. J.C. Berndtsson, L. Bengtsson, K. Jinnob, Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs, *Ecol. Eng*. 35 (2009) 369–380.
5. D. Suszanowicz, Model research on the influence of green roofs on environmental parameters in urban agglomerations, *E3S Web Conf*. 45 (2018).
6. U. Berardi, The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits, *Energy Build*. 121 (2016) 217–229.
7. 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.
8. L. Yao, Z. Wu, Y. Wang, S. Sun, W. Wei, Y. Xu, Does the spatial location of green roofs affects runoff mitigation in small urbanized catchments?, *J. Environ. Manage*. 268 (2020) 110707. doi:10.1016/j.jenvman.2020.110707.
9. 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.
- 10.T. Susca, Green roofs to reduce building energy use? A review on key structural factors of green roofs and their effects on urban climate, *Build. Environ.* 162 (2019) 106273. doi:10.1016/j.buildenv.2019.106273.
 - 11.T. Liberalesso, C. Oliverira Cruz, C. Matos Silva, M. Manso, Green infrastructure and public policies: An international review of green roofs and green walls incentives, *Land Use Policy.* 96 (2020) 104693. doi:<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104693>.
 - 12.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.
 - 13.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.
 - 14.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. doi:10.1016/J.APENERGY.2019.03.153.
 - 15.G. Kokogiannakis, J. Darkwa, K. Yuan, A combined experimental and simulation method for appraising the energy performance of green roofs in Ningbo's Chinese climate, *Build. Simul.* 7 (2014) 13–20. doi:10.1007/s12273-013-0149-0.
 - 16.A. Pyrgou, J. Yang, M. Santamouris, Green roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climates for institutional buildings under free floating conditions, in: *14th Asia Pacific Conf. Built Environ.*, Bali, Indonesia, 2017.
 - 17.F. Ardente, M. Beccali, M. Cellura, M. Mistretta, Energy and environmental benefits in public buildings as a result of retrofit actions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 460–470. doi:10.1016/j.rser.2010.09.022.
 - 18.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.
 - 19.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.
 - 20.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.
 - 21.C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy Build.* 42 (2010) 959–965.
 - 22.S. Cascone, J. Coma, A. Gagliano, G. Pérez, The evapotranspiration process in green roofs: A review, *Build. Environ.* 147 (2019) 337–355.
 - 23.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.
 - 24.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.
 - 25.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.
 - 26.Y. Cengel, M. Boles, *Termodinámica*, Mc Graw Hill, Mexico, 2003.
 - 27.R. Martens, B. Bass, S. Saiz Alcazar, Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance, *Urban Ecosyst.* 11 (2008) 399–408.
 - 28.Conagua SMN, Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's), (n.d.). <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> (accessed 29 August 2019).
 - 29.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.
- 30.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 a green roof in a semi-warm climate in Mexico, *Energy Build.* 154 (2017) 232–243.
- 31.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.
- 32.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.