



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Modelado y Simulación de Azoteas Verdes

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Eléctrico Electrónico

P R E S E N T A

Salvador Gudiño Gómez

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Sergio Quezada García



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020

Agradecimientos

Gracias a mis padres por todo el trabajo y sacrificio que han hecho durante todos estos años para que pueda hacer realidad este logro, a mis hermanos por su apoyo incondicional. Espero que con este trabajo represente para ustedes una pequeña moneda de pago por todo lo que han hecho por mí.

Gracias a Cynthia por ser mi amiga y consejera en buenos y malos momentos durante esta etapa de formación.

Agradezco a mis profesores y compañeros, cada día que compartí con ellos me enseñaron alguno nuevo, de forma personal y profesional.

Pocos saben lo complicado que fue para mí llegar al día de mi titulación, incluso llegué a dudar de mí, pero todo fue gracias a que nunca renuncié a mi objetivo de terminar mis estudios y el presentar esta tesis. Durante mis estudios de licenciatura llegué a sorprenderme al darme cuenta de lo que puedo llegar a hacer.

“Un milagro no es la respuesta”

(As I Lay Dying)

Resumen

En el presente trabajo se comparó el comportamiento térmico interior de una edificación, que se consideró un sistema cerrado, con azotea convencional y con azotea verde, en los estados de Yucatán, Coahuila y Ciudad de México. Estas tres regiones se tomaron en cuenta para tener un caso base (Ciudad de México), caso intermedio (Yucatán) y caso extremo (Coahuila). La comparación se realizó con las condiciones climatológicas de cada lugar para determinar si las azoteas verdes ayudan a alcanzar la temperatura de confort dentro de la edificación o bien pueden servir como apoyo para un equipo de climatización reduciendo la carga térmica. Esto puede tener beneficios como el ahorro en el consumo de la energía eléctrica por climatización. Con ayuda de la literatura, se desarrolló un modelo matemático que, a través del balance de energía, considera la transferencia de calor a través de la azotea y las paredes de la edificación hacia el interior de ésta. Los datos de entrada del modelo matemático son la radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente, en la literatura no se encontró un modelo matemático que requiera tan pocos datos de entrada y tan fácilmente medibles. El modelo se validó comparando la temperatura de la capa verde obtenida con el modelo matemático y la temperatura de la planta obtenida a partir de datos experimentales publicados en la literatura, el error absoluto máximo fue menor a 3°C. Para los casos de estudio, los resultados mostraron que las azoteas verdes ayudan a disminuir la oscilación de la temperatura interior hasta en 14°C. Mientras que la temperatura interior máxima se pudo reducir hasta en 12°C, como fue el caso de Coahuila. Esto demostró que una azotea verde ayuda a disminuir la temperatura interna en una edificación, incluso en lugares donde es indispensable el uso de aire acondicionado para alcanzar la temperatura de confort dentro de la edificación.

Contenido

Agradecimientos.....	1
Resumen.....	3
Contenido.....	4
Índice de figuras.....	6
Índice de tablas.....	8
Objetivos.....	9
Objetivo principal.....	9
Objetivos particulares.....	9
1. Introducción.....	10
1.1. Beneficios de las Azoteas Verdes.....	11
1.1.1. Aumento de bosques urbanos.....	12
1.1.2. Purificación del aire.....	12
1.1.3. Reducción de escorrentía.....	12
1.1.4. Prolongación de la vida del techo.....	13
1.1.5. Reducción del efecto isla de calor.....	13
1.1.6. Mayor interés arquitectónico.....	14
1.1.7. Ahorro de energía en edificaciones.....	14
2. Métodos.....	16
2.1. Descripción del Sistema.....	16
3. Modelo Matemático.....	18
3.1. Modelo de transferencia de calor para los elementos envolventes.....	18
3.2. Balance de energía para el interior de la edificación.....	21

3.3. Modelo matemático de transferencia de calor para el techo verde	21
4. Implementación	25
5.1 Método de solución numérica.....	25
4.2 Secuencia de cálculo.....	27
5. Validación	28
6. Casos de Estudio	32
6.1 Ciudad de México.....	32
6.2 Yucatán.....	40
6.3 Coahuila.....	43
7. Conclusiones	47
Apéndice.....	48
Nomenclatura	54
Referencias	56

Índice de figuras

Fig. 1.1 Esquema de la composición de una azotea verde.	10
Fuente: elaboración propia.	10
Fig. 1.2 Plantas tipo crassas.	11
Fig. 2.1. Edificio caso de estudio que recibe radiación solar en una pared durante la mañana, en la pared contraria durante la tarde y en la azotea durante gran parte del día.	17
Fig. 3.1 Fuentes de calor para el techo convencional.....	18
Fig. 3.2. Condiciones de frontera para las envolventes de la edificación.	20
Fig. 3.3. Fuentes de calor para el techo verde.	22
Fig. 4.1. Nodalización para el techo verde y los elementos constructivos.....	26
Fig. 4.2. Diagrama de flujo del modelo.....	27
Fig. 5.1. Datos meteorológicos durante 24 horas en Guangzhou, China.	30
Fig. 5.2. Validación del modelo propuesto comparando la temperatura de la capa verde y la temperatura de la planta.	31
Fig. 6.1. Radiación solar incidente en el techo y las paredes del edificio para un día cálido en la Ciudad de México (SMN, n.d.).....	32
Fig. 6.2. Temperatura ambiente y velocidad del viento para un día cálido en la Ciudad de México (SMN, n.d.).....	33
Fig. 6.3. Comparación del perfil de temperatura para un edificio con azotea convencional para dos casos. El primer caso despreciando la transferencia de calor a través de las paredes y el segundo caso considerando la transferencia de calor a través de éstas.	34
Fig. 6.4. Comparación del perfil de temperatura para un edificio con azotea verde para dos casos. El primer caso despreciando la transferencia de calor a través de las paredes y el segundo caso considerando la transferencia de calor a través de éstas.	35
Fig. 6.5. Distribución de temperaturas para el edificio con techo convencional.	36

Fig. 6.6. Distribución de temperaturas para el edificio con techo verde.....	37
Fig. 6.7. Comparación de la temperatura interior del edificio con techo convencional y techo verde.	37
Fig. 6.8 Promedios de la radiación solar durante una semana en la delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México.	38
Fig. 6.9 Promedios de la temperatura ambiente durante una semana en la delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México.	38
Fig. 6.10 Promedios de la velocidad del viento durante una semana en la delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México.	39
Fig. 6.11 Comportamiento de la temperatura interior de una edificación con azotea convencional vs una edificación con una azotea verde en la Ciudad de México.	39
Fig. 6.12 Promedios de la radiación solar durante una semana en el municipio de Valladolid, Yucatán.....	41
Fig. 6.13 Promedios de la temperatura durante una semana en el municipio de Valladolid, Yucatán.....	41
Fig. 6.14 Promedios de velocidad del viento durante una semana en el municipio de.....	41
Fig. 6.15 Comportamiento de la temperatura interior de una edificación con azotea convencional vs una edificación con una azotea verde en Yucatán.	42
Fig. 6.16 Promedios de la radiación durante una semana en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila.	43
Fig. 6.17 Promedios de la temperatura durante una semana en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila.	44
Fig. 6.18 Promedios de la velocidad del viento durante una semana en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila.	44
Fig. 6.19 Comportamiento de la temperatura interior de una edificación con azotea convencional vs una edificación con una azotea verde en Coahuila.	45

Índice de tablas

Tabla 5.1. Propiedades de los materiales que forman la azotea verde.	28
Tabla 5.2. Valores paramétricos.....	29

Objetivos

Objetivo principal

Comparar mediante el modelado y la simulación de azoteas verdes el comportamiento térmico del interior de dos edificaciones una con azotea convencional y otra con azotea verde, determinando el impacto, durante el verano, de ambas azoteas sobre la temperatura interior de las edificaciones construidas en diferentes regiones del país.

Objetivos particulares

- Analizar el funcionamiento térmico de las azoteas verdes identificando los flujos de calor más representativos.
- Proponer un modelo de transferencia de calor para azoteas verdes mediante balances de masa y energía, aplicando las leyes de la termodinámica.
- Comparar la temperatura interior de una edificación con azotea convencional y otra con azotea verde, simulando la transferencia de calor a través de las envolventes de la edificación.
- Implementar el modelo matemático en un lenguaje de programación para simular el comportamiento térmico interior de las dos edificaciones, comparando así la temperatura interior de una edificación con azotea convencional y otra con azotea verde.

1. Introducción

Una azotea verde¹ está formada por una serie de capas, como se muestra en la **Fig. 1.1**, que se instalan en una azotea convencional. 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
- Sistema de irrigación² cuando el sistema lo requiere

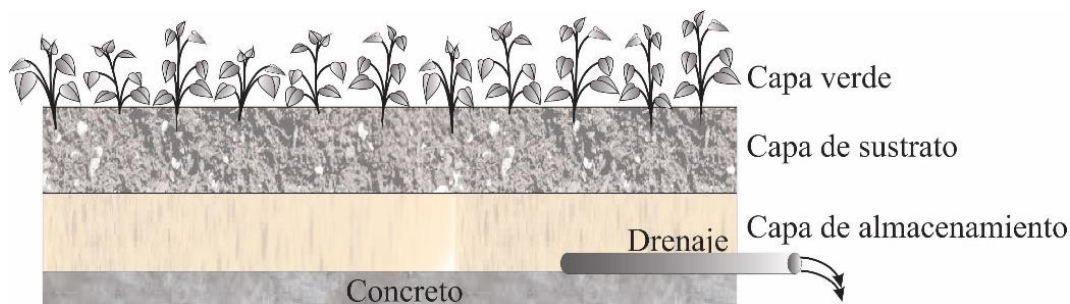


Fig. 1.1 Esquema de la composición de una azotea verde.

Fuente: elaboración propia.

Las azoteas verdes son una técnica de refrigeración pasiva que impide que la radiación solar llegue a la construcción, algunas de las características más importantes de los medios de cultivo son las propiedades físicas, tales como conductividad térmica, calor específico y la densidad (Sailor, 2008). Los techos verdes se clasifican de acuerdo con la profundidad del sustrato y el mantenimiento requerido:

- 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*, en la **Fig. 1.2**, se muestran algunos tipos de esta planta. Este tipo de azotea verde

¹ Azotea con diferentes capas como son: membrana impermeable, medio de cultivo y una capa de vegetación

² Riego.

requiere poco mantenimiento y puede llevarse a cabo en edificios existentes, debido a que no supone una carga adicional importante para la estructura.



Fig. 1.2 Plantas tipo crassas.

Fuente elaboración propia.

- Intensivos: el sustrato tiene una profundidad mayor a los 15 cm, por lo que es posible tener auténticos jardines en las azoteas. En estas azoteas se pueden alojar una gran cantidad de plantas, incluyendo arbustos y árboles pequeños. Estas azoteas requieren de un mantenimiento regular y se planean desde la construcción del edificio debido a que la carga adicional de peso es grande.

1.1. Beneficios de las Azoteas Verdes

Muchos estudios se han realizado en los últimos años relacionados con las azoteas verdes, debido a los múltiples beneficios que ofrecen, tales como:

1.1.1. Aumento de bosques urbanos

Actualmente es difícil ampliar con rapidez o mejorar espacios verdes existentes, por lo tanto, las azoteas verdes se consideran como una buena alternativa a la adquisición de bosques urbanos³. Así, pueden jugar un papel importante en el aumento de áreas verdes en zonas urbanas densamente pobladas (Berndtsson et al., 2009).

1.1.2. Purificación del aire

En las ciudades, los parques son capaces de filtrar hasta un 80% de la contaminación del aire, mientras que los árboles en avenidas pueden filtrar hasta en un 70%. Incluso sin las hojas (en invierno), las plantas aún conservan el 60% de su eficacia: reducen el contenido de plomo en el aire, reducen el ruido hasta 12 dB (Renterghem and Botteldooren, 2009) y proporcionan un suministro de oxígeno en condiciones meteorológicas tranquilas. Por lo tanto, las zonas verdes y los árboles deben cubrir una mayor área en las ciudades (Saito et al., 1990).

Las plantas pueden mejorar la calidad del aire mediante la eliminación de contaminantes. En un día soleado, una azotea verde puede disminuir la concentración de CO₂ en la región cercana en un 2% (Li et al., 2010). Otros estudios indican que los techos verdes pueden eliminar O₃, NO₂, SO₂; así como pequeñas partículas de cenizas, hollín, polvo y metales (Yang et al., 2008).

1.1.3. Reducción de escorrentía

La escorrentía es el agua que cae y corre sobre los techos de los edificios, calles, aceras y cualquier superficie impermeable durante la lluvia. Esta agua no se filtra por el suelo, fluye sobre las

³ Árboles y vegetación que se encuentran dentro de la ciudad.

superficies, arrastra todo lo que está a su alcance como basura y otros contaminantes, llega al drenaje y posteriormente contamina los mantos acuíferos.

Un porcentaje cada vez mayor de la población mundial vive en ciudades, el desplazamiento de la tierra por superficies impermeables de calles, calzadas y edificios intensifica la cantidad de escorrentía, las azoteas verdes pueden ser usadas para reducir su volumen.

Es un hecho que la escorrentía total anual de una azotea verde es generalmente menor que el volumen de escorrentía de una superficie dura (Berndtsson et al., 2009; Getter et al., 2011; Mentens et al., 2006; Speak et al., 2013; Stovin et al., 2012). La construcción de azoteas verdes puede estar justificada por su contribución a la reducción de volumen de agua de escorrentía (Berndtsson et al., 2009).

Mentens et al. (2006) analizan las mediciones divulgadas en 18 publicaciones sobre la reducción de escorrentía, encontrando que los techos verdes pueden reducir hasta en un 54% el volumen de la cantidad total.

1.1.4. Prolongación de la vida del techo

En la actualidad, las azoteas verdes son principalmente un valor adicional en la longevidad del techo. La implementación de esta tecnología requiere preparar a la azotea convencional mediante la aplicación de impermeabilizantes especiales entre otras medidas que pueden hacer que la vida útil de la azotea se duplique (Clark et al., 2008; Kosareo and Ries, 2007; Saiz et al., 2006).

1.1.5. Reducción del efecto isla de calor

El efecto isla de calor es el fenómeno que presentan algunas ciudades al mantener una temperatura mayor que la región circundante a causa de actividades humanas e industriales. Esta diferencia de temperatura puede ser de hasta 10°C. El aumento de la temperatura provoca un mayor consumo de energía para refrigerar (Ye et al., 2012).

Una medida para disminuir el efecto de isla de calor urbano es proporcionar a los edificios con revestimientos que puedan reducir la absorción de energía solar (Ye et al., 2012). Wilmers (1988) mediante un estudio experimental muestra la disminución del efecto isla de calor cerca de un área verde. La diferencia de temperatura disminuye en su rango y aumenta su alcance con el tamaño del área verde.

La distribución de temperatura del aire en una zona urbana está estrechamente relacionada con la distribución de áreas verdes (Saito et al., 1990). Los árboles y los espacios verdes contribuyen considerablemente a la disminución de la temperatura urbana por enfriamiento evaporativo. Así, las azoteas verdes contribuyen a la reducción del efecto de isla de calor urbano (Lin et al., 2008; Santamouris, 2014; Takebayashi and Moriyama, 2007; Weng and Yang, 2004; Wong and Lau, 2013; Wong et al., 2003; Wong and Chen, 2005).

1.1.6. Mayor interés arquitectónico

Las azoteas verdes pueden proporcionar beneficios estéticos en los edificios donde son instalados. En algunos países de Europa se colocan por razones estéticas. Algunas son diseñadas como auténticos jardines con capas profundas de sustrato y grandes plantas, tales como árboles y arbustos. Además las azoteas verdes contribuyen a la preservación de la biodiversidad (Madre et al., 2013).

1.1.7. Ahorro de energía en edificaciones

Las azoteas verdes pueden reducir el uso de aire acondicionado o calefacción dentro de una edificación, por lo que es posible el ahorro de energía destinada a climatización.

Muchos estudios se han realizado para considerar el potencial de ahorro de energía en los edificios con azoteas verdes, demostrando que pueden ofrecer beneficios en la reducción de la calefacción durante el invierno, así como de refrigeración en el verano (Castleton et al., 2010; Hong et al.,

2012; Onmura et al., 2001; Theodosiou, 2003; Zinzi and Agnoli, 2012). Sin embargo, estos beneficios son difíciles de cuantificar.

En general, los resultados de los estudios indican que las azoteas verdes contribuyen a reducir la amplitud de la oscilación térmica en la superficie externa e interna del techo, contribuyendo con esto al mantenimiento de las condiciones de confort térmico interior y por lo tanto un menor consumo de energía por climatización (Parizotto and Lamberts, 2011).

Así, para aprovechar los múltiples beneficios de las azoteas verdes, los gobiernos de algunas de las sociedades más urbanizadas, como Japón, Singapur, Alemania y Bélgica, han ofrecido incentivos para alentar e incluso imponer su uso (Wong et al., 2003).

2. Métodos

Se realiza una revisión de la literatura relativa a la transferencia de calor a través de azoteas verdes para determinar cuáles son los modelos matemáticos más completos que se tienen hasta la fecha. Se identifican los principales flujos de calor presentes reuniendo las expresiones matemáticas empleadas para su cálculo, seleccionando las más prácticas, es decir, aquellas expresiones que requieran un menor número de datos de entrada. Se propone un modelo matemático de transferencia de calor para las azoteas verdes y se implementa en el lenguaje de programación Python. El modelo es validado con datos prácticos, experimentales o datos publicados en la literatura. Se simula y se compara el comportamiento térmico del interior de dos edificaciones, una con azotea convencional y otra con azotea verde, para distintas zonas del país.

2.1. Descripción del Sistema

En el presente trabajo se estudian dos tipos de azoteas:

- Azoteas convencionales, como las que se utilizan normalmente construidas a partir de concreto.
- Azoteas verdes, que se proponen como solución alternativa a las azoteas convencionales. Formadas por una capa verde y una capa de sustrato.

Por lo tanto, se presentan modelos de transferencia de calor para los dos casos mencionados. Estos modelos son empleados para determinar la temperatura en el interior una edificación, la cual se considera un sistema cerrado. Los modelos también consideran la transferencia de calor a través de las paredes del edificio, las cuales son de loza maciza de concreto de 15 cm de espesor.

El edificio caso de estudio no cuenta con ventanas y es calentado por medio de la radiación solar que recibe a través de dos paredes, así como a través de la azotea como se muestra en la **Fig. 2.1**. Una de las paredes recibe radiación solar durante la mañana y la pared opuesta recibe radiación solar durante la tarde. Para este estudio, se considera que las otras dos paredes (paredes laterales)

no reciben radiación solar a lo largo del día. En el estudio se considera que las paredes no tienen ventanas y que no hay transferencia de masa entre el interior y el exterior de la edificación.

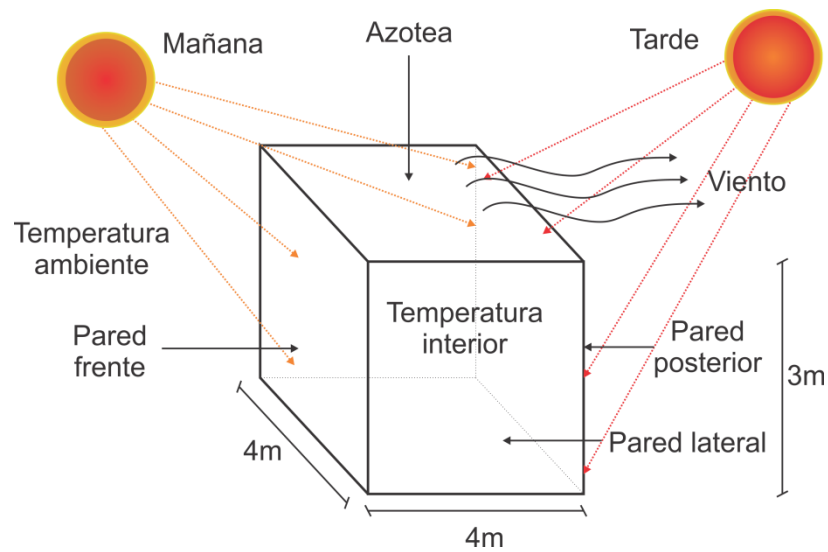


Fig. 2.1. Edificio caso de estudio que recibe radiación solar en una pared durante la mañana, en la pared contraria durante la tarde y en la azotea durante gran parte del día.

Fuente elaboración propia.

3. Modelo Matemático

En esta sección se presenta el modelo matemático de transferencia de calor para los elementos envolventes, el interior de la edificación y la azotea verde.

3.1. Modelo de transferencia de calor para los elementos envolventes

En esta sección se presenta el modelo matemático de transferencia de calor para los elementos envolventes convencionales de un edificio. El modelo considera la transferencia de calor unidimensional a través del techo y las paredes, se considera que estos elementos están constituidos por un solo material opaco uniforme, es decir, no se consideran ventanas. En la **Fig. 3.1** se muestran las fuentes de calor presentes en una azotea convencional.

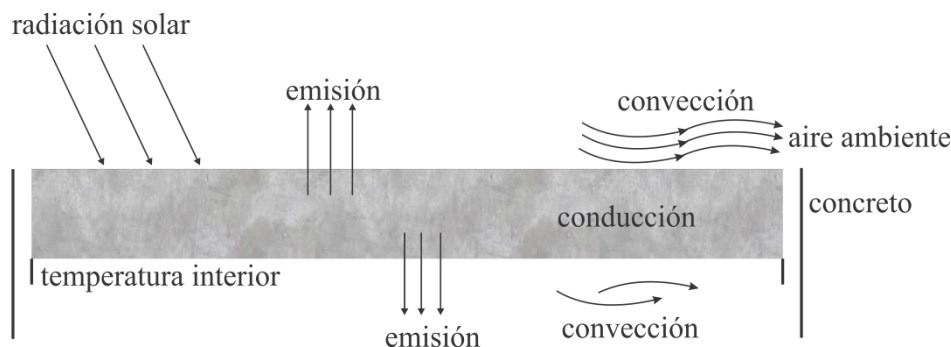


Fig. 3.1 Fuentes de calor para el techo convencional.

Fuente elaboración propia.

La transferencia de calor por conducción, a través de las envolventes del edificio, está dada por:

$$\rho C_p \frac{\partial T_t}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T_t}{\partial x^2} \tag{3.1}$$

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

La condición de frontera en el exterior de la edificación ($x=0$) está dada por:

$$-k \frac{dT_t}{dx} \Big|_{x=0} = q_{sr} - q_{em} - q_{cv} \quad (3.2)$$

donde q_{sr} es el flujo de calor debido a la radiación de onda corta, q_{em} es el flujo de calor por la radiación neta emitida y q_{cv} es el flujo de calor debido a la convección. Estas fuentes de calor se calculan a partir de:

$$q_{sr} = \alpha q_{sri} \quad (3.3)$$

$$q_{em} = \varepsilon \sigma (T_{exs}^4 - T_e^4) \quad (3.4)$$

$$q_{cv} = h(T_{exs} - T_a) \quad (3.5)$$

donde T_{exs} es la temperatura de la superficie exterior (sea la pared o el techo convencional), α es la absorptividad de la superficie exterior del techo, q_{sri} es la radiación de onda corta incidente, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann, T_a es la temperatura del aire en el exterior, T_e es la temperatura de los alrededores y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, el cual se puede calcular a partir del número adimensional de Nusselt, dado por:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3.6)$$

donde L es la longitud de la envolvente paralela al flujo de aire. El número de Nusselt para paredes planas está dado por (Churchill and Ozoe, 1973):

$$Nu = \frac{0.3387 Pr^{1/3} Re^{1/2}}{\left(1 + \left(\frac{0.0468}{Pr}\right)^{2/3}\right)^{1/4}} \quad (3.7)$$

donde Re es el número adimensional de Reynolds y Pr es el número adimensional de Prandtl los cuales están dados por:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (3.8)$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k} \quad (3.9)$$

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

La condición de frontera en el interior de la edificación está dada por:

$$-k \left. \frac{dT_t}{dx} \right|_{x=\gamma} = h_{in} (T_{ins} - T_{in}) \quad (3.10)$$

donde T_{ins} es la temperatura de la superficie interior (sea la pared o el techo), γ es el espesor de la envolvente, T_{in} es la temperatura del aire contenido en el interior de la edificación y h_{in} es el coeficiente combinado de transferencia de calor en el interior del edificio, el cual considera la transferencia de calor por convección y radiación. En la **Fig. 3.2** se ejemplifican las condiciones de frontera. Este modelo se puede emplear para cada uno de los elementos envolventes del edificio.

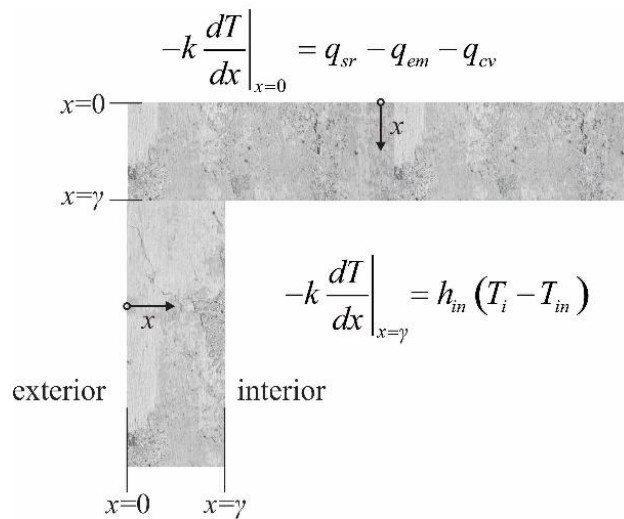


Fig. 3.2. Condiciones de frontera para las envolventes de la edificación.

Fuente elaboración propia.

3.2. Balance de energía para el interior de la edificación

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

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} \quad (3.11)$$

donde m es la masa de aire contenida en el interior de la edificación y \dot{Q} es el calor neto que se transfiere al interior a través de los elementos envolventes y está dado por:

$$\dot{Q} = \sum h_{in} (T_i - T_{in}) A_i \quad (3.12)$$

donde T_i y A_i es la temperatura en la superficie y el área del elemento envolvente i , respectivamente.

Este modelo no considera la contribución debida a fuentes internas de calor como personas o aparatos eléctricos. El modelo tampoco considera el intercambio de masa entre el interior del edificio y el exterior.

3.3. Modelo matemático de transferencia de calor para el techo verde

A continuación, se presenta el modelo matemático de transferencia de calor para la capa verde y la capa de sustrato. Al acoplar este modelo a la Ec. 3.1 se tienen el modelo para la azotea verde. En la **Fig. 3.3** se muestra la constitución de la azotea verde, así como los flujos de calor presentes.

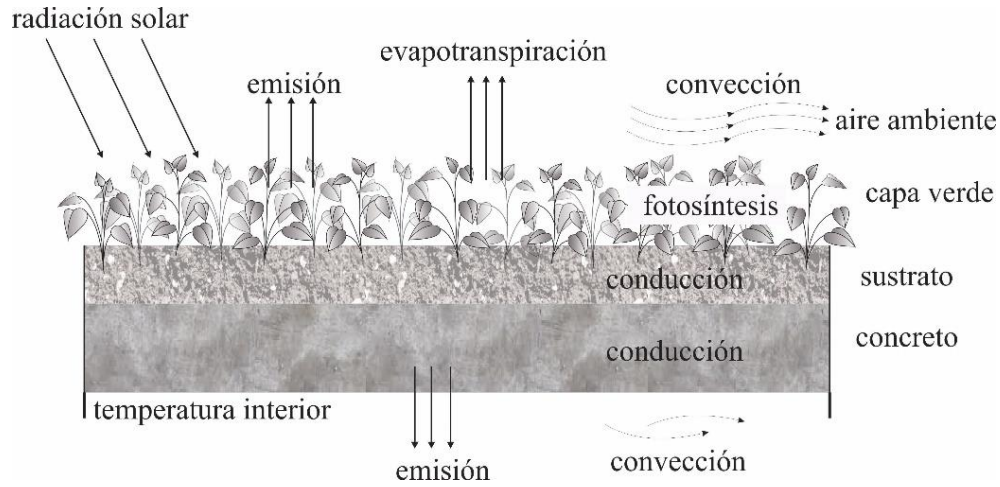


Fig. 3.3. Fuentes de calor para el techo verde.

Fuente elaboración propia.

El calor que se transfiere por conducción a través de la capa verde formada por las plantas y el aire está dado por:

$$(\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} \quad (3.13)$$

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 pueden obtener a partir de (Quezada-García et al., 2017):

$$(\rho C_p)_{ef} = (\rho C_p)_1 (1 - \beta) + (\rho C_p)_2 \beta \quad (3.14)$$

$$k_{ef} = k_1 (1 - \beta) + k_2 \beta \quad (3.15)$$

donde el subíndice ef hace referencia a una propiedad efectiva, los subíndices 1 y 2 se refieren a los componentes de las capas (para la capa verde son aire y plantas, para la capa de sustrato son tierra y agua) y β es la fracción volumen que ocupa el componente 1 en el volumen total de la capa, es decir:

$$\beta = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (3.16)$$

Por otro lado, el calor transferido por conducción a través de la capa de sustrato, formada por tierra y agua, está dado por:

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} \quad (3.17)$$

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.

La condición de frontera para la Ec. 3.13 en el exterior del edificio ($x=0$) está dada por:

$$-k_v \left. \frac{dT_g}{dx} \right|_{x=0} = q_{sr} - q_{em,g} - q_{cv,g} - q_{et} - q_{ps} \quad (3.18)$$

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 a partir de la correlación (Feng et al., 2010):

$$q_{ps} = \frac{6.5}{TC(1 + R_{ep}/R_{tp})} q_{et} \quad (3.19)$$

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

El calor perdido por la evapotranspiración está dado por (Feng et al., 2010):

$$q_{et} = \lambda R_{et} \quad (3.20)$$

donde λ es el calor latente de vaporización y R_{et} es la tasa de evapotranspiración. La evapotranspiración es la pérdida de agua de la superficie de la tierra a través de la evaporación del agua contenida en el suelo y a través de la transpiración de las plantas (Xing et al., 2012). La evapotranspiración se puede calcular a partir de la ecuación de Hargreaves que se basa en datos climáticos fácilmente disponibles (Hargreaves et al., 2003):

$$ET_0 = 0.0023 q_{sri} (T_a - 255.35) T_R^{0.5} \quad (3.21)$$

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

$$T_R = T_{\max} - T_{\min} \quad (3.22)$$

El calor transferido por convección (q_{cv}) de la capa verde al exterior se calcula a partir de la correlación (Meng et al., 2006):

$$q_{cv,g} = (5.7 + 3.8v)(T_g - T_a) \quad (3.23)$$

El intercambio de calor entre la capa verde y el ambiente por medio de emisión se determina a partir de:

$$q_{em,g} = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (3.24)$$

donde T_{sky} es la temperatura cielo la cual se puede estimar de diferentes maneras. [Evangelisti et al. \(2019\)](#) realizaron una revisión sobre las correlaciones existentes para el cálculo de la temperatura cielo en función de diferentes condiciones climáticas.

4. Implementación

En esta sección se presentan las ecuaciones necesarias para que la simulación en Python funcione y el diagrama de flujo del programa. En el Apéndice 1 se muestra el programa realizado en Python 3.6.3 y la estructura del input.

5.1 Método de solución numérica

Las Ecs. 3.1, 3.13 y 3.17 se pueden escribir de la forma:

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T_t}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_t}{\partial x} \right) \quad (4.1)$$

la forma discreta de la Ec. 4.1 está dada por:

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{\Delta t}{(\Delta x)^2} \frac{k_{ef}}{(\rho C_p)_{ef}} (T_{j+1}^t - 2T_j^t + T_{j-1}^t) \quad (4.2)$$

Las condiciones de frontera para las Ecs. 3.2, 3.10 y 3.18 se pueden escribir como:

$$-k \frac{dT}{dx} = \sum q \quad (4.3)$$

La forma discreta de la Ec. 4.3 está dada por:

$$T_{j+1} = T_j - \frac{\Delta x}{k} \sum q \quad (4.4)$$

Mientras que la Ec. 3.11 tiene la siguiente forma discreta:

$$T_{in}^{t+\Delta t} = T_{in}^t + \Delta t \frac{\dot{Q}}{(mC_p)_{in}} \quad (4.5)$$

Los modelos matemáticos de transferencia de calor para la azotea convencional y la azotea verde son implementados en Python 3.6.3. Las ecuaciones diferenciales son resueltas por medio de diferencias finitas utilizando un tamaño de paso temporal de 1.2s y 11 nodos para cada envolvente de la edificación, en la **Fig. 4.1** se muestra la distribución de los nodos en el sistema.

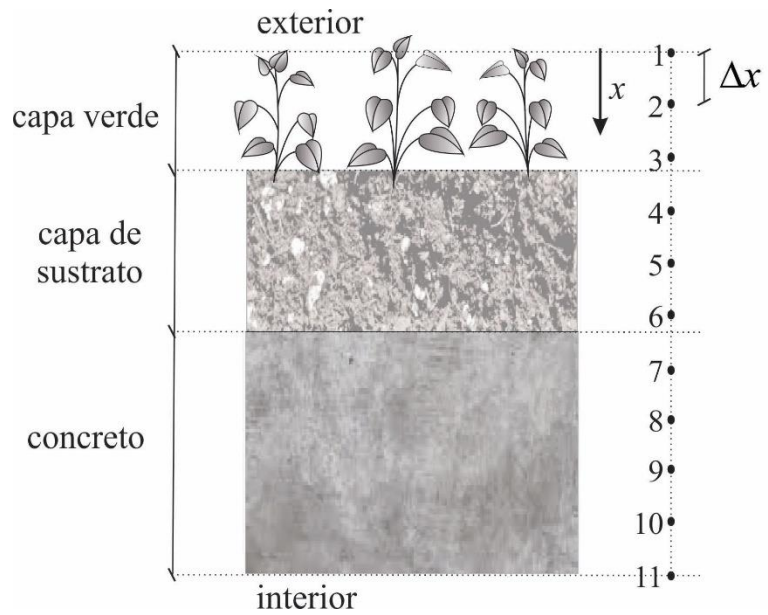


Fig. 4.1. Nodalización para el techo verde y los elementos constructivos.

Fuente elaboración propia.

4.2 Secuencia de cálculo

El proceso para resolver el modelo se resume en la **Fig. 4.2**.

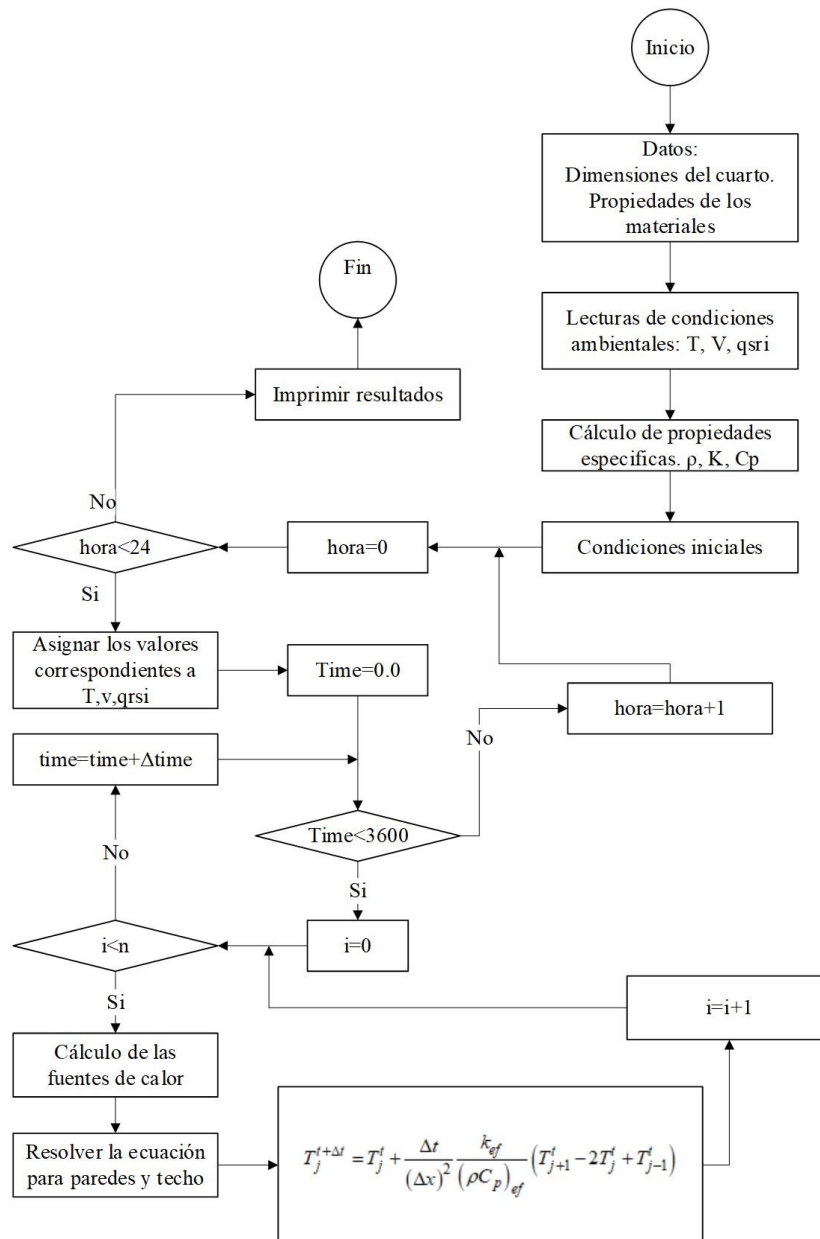


Fig. 4.2. Diagrama de flujo del modelo.

Fuente elaboración propia.

5. Validación

En esta sección se presenta la validación del modelo matemático con datos publicados en la literatura. Es importante mencionar que la mayoría de los artículos publicados, sobre el modelado de transferencia de calor a través de azoteas verdes, presentan los resultados obtenidos con el modelo y la comparación con los datos medidos, sin embargo, no reportan los datos de entrada necesarios para probar el modelo. Algunos de estos modelos requieren una gran cantidad de datos de entrada que sólo pueden ser obtenidos mediante costosos instrumentos de medición. Por tal razón, los resultados de estos artículos no pueden ser repetidos por otros investigadores. Son muy pocos los artículos que reportan los datos de entrada. [Feng et al. \(2010\)](#) reportan los valores de la radiación solar, temperatura de bulbo seco, punto de rocío y velocidad del viento. Estos datos son utilizados en el presente trabajo para la validación del modelo propuesto. Las propiedades de los materiales, que conforman la azotea verde, se reportan en la **Tabla 5.1**. Los valores paramétricos utilizados para la validación del modelo se reportan en la **Tabla 5.2**. Los datos meteorológicos se muestran en la **Fig. 5.1**.

Tabla 5.1. Propiedades de los materiales que forman la azotea verde.

Propiedad	Plantas	Tierra	Concreto	Aire	Agua
C_p ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	4800	840	840	1007	4186
ρ (kg m^{-3})	582	1200	1800	1.184	1000
k ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$)	0.350	1.000	0.800	0.0255	0.580

Para validar el modelo se compara la temperatura de la capa verde obtenida con el modelo matemático y la temperatura de la planta obtenida a partir del calor perdido por convección y emisión de los datos de [Feng et al. \(2010\)](#). Los resultados se muestran en la **Fig. 5.2**. Las principales desviaciones de los resultados con respecto a [Feng et al. \(2010\)](#) presentan un error absoluto menor a los 3°C . Esta desviación se debe a que la temperatura en el interior de la edificación se considera constante pero en realidad se encuentra oscilando alrededor de los 26°C ,

según reportan los autores, para lo cual utilizan un equipo de aire acondicionado. Para determinar la transferencia de calor entre el aire del interior de la edificación y la superficie interior del techo se utiliza un coeficiente combinado de transferencia de calor igual a $5 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$, que es un valor promedio para el interior de una edificación y considera los fenómenos convectivos y radiativos (Cengel, 2007).

Por lo tanto, de acuerdo con los resultados la exactitud del modelo propuesto en el presente trabajo se considera aceptable. Es importante mencionar, que se elige la temperatura de la planta para la validación del modelo debido a que es un dato que se puede calcular directamente a partir de los resultados de Feng et al. (2010). No se utiliza la temperatura del techo dentro de la habitación debido a que no es posible calcularla a partir de los resultados del autor. Sin embargo, con el modelo matemático propuesto en el presente trabajo se puede calcular dicha temperatura suponiendo un coeficiente combinado de transferencia de calor para el interior.

Tabla 5.2. Valores paramétricos.

Parámetro	Valor	Unidades
α	0.85	Adimensional
ε	1.0	Adimensional
TC	20	Adimensional
R_{ep}/R_{ip}	1.0	Adimensional
β_{water}	0.24	Adimensional
β_{air}	0.50	Adimensional
λ	2430000	J kg^{-1}
σ	5.67×10^{-8}	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$
T_{in}	299.15	K
hi_n	5	$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$
Profundidad capa verde	6.0	cm
Profundidad sustrato	9.0	cm
Profundidad concreto	15.0	cm

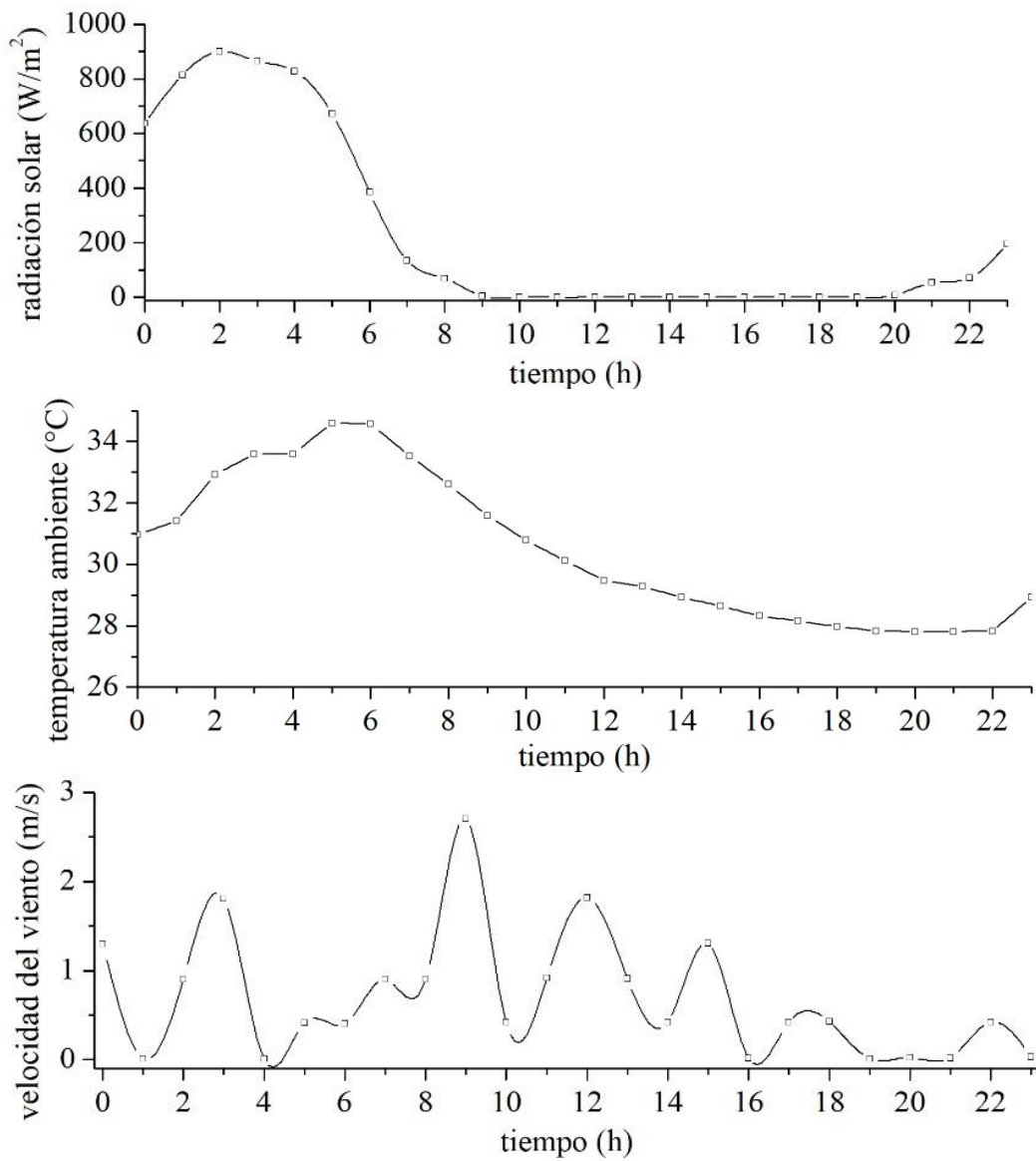


Fig. 5.1. Datos meteorológicos durante 24 horas en Guangzhou, China. (Estableciendo 9:00 AM de 21 Julio de 2009 como hora 0) (Feng et al., 2010).

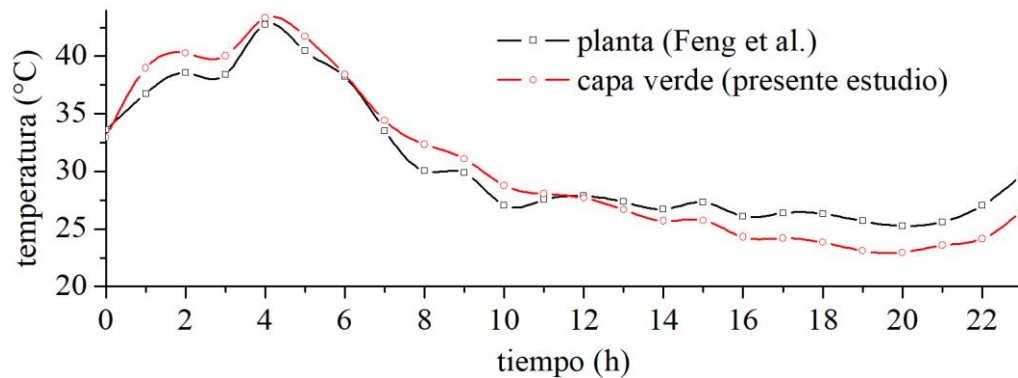


Fig. 5.2. Validación del modelo propuesto comparando la temperatura de la capa verde y la temperatura de la planta.
(Calculada a partir de los datos publicados de [Feng et al. \(2010\)](#)).

Es importante mencionar que el modelo propuesto en el presente trabajo, sólo requiere las propiedades de los materiales y las variables climáticas: temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar, como datos de entrada para modelar la transferencia de calor a través de las envolventes del edificio. Estas variables climáticas son fáciles de obtener debido a que en muchas regiones se encuentran instaladas estaciones meteorológicas cuyos datos están disponibles para el público en general.

6. Casos de Estudio

En esta sección se explica el comportamiento térmico de una azotea convencional y una azotea verde durante un día caluroso para tres diferentes estados del país donde se realizarán las simulaciones para la azotea convencional y la azotea verde.

6.1 Ciudad de México

En la **Fig. 6.1** se muestra la radiación solar que reciben las paredes y la azotea a lo largo del día. Las paredes laterales no reciben radiación solar. El exterior del edificio está en contacto con el aire ambiente cuya temperatura se encuentra entre 17°C y 32°C (ver **Fig. 6.2**) y su velocidad oscila entre los 0 m/s y 4 m/s. La fracción volumen del aire contenido en la capa verde se considera igual a 0.53 y la fracción volumen de agua contenida en la capa de sustrato se considera igual a 0.26. La emisividad se considera igual a 1.0, y la absorptividad se considera igual a 0.85, para todos los elementos envolventes del edificio.

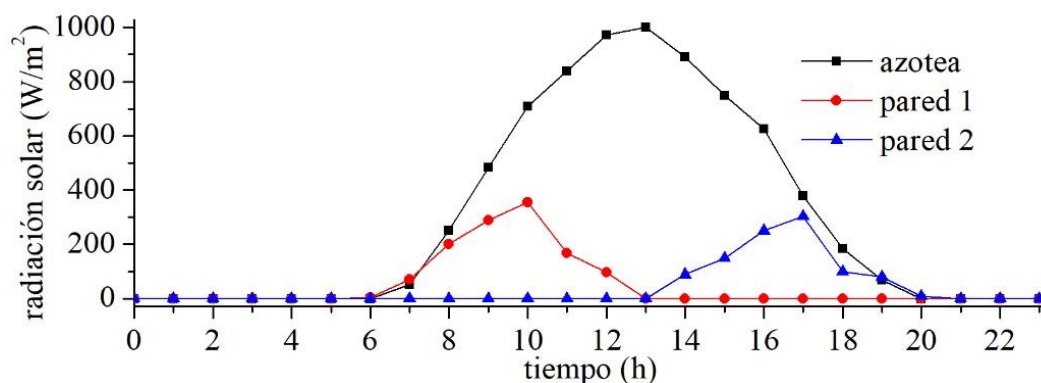


Fig. 6.1. Radiación solar incidente en el techo y las paredes del edificio para un día cálido en la Ciudad de México (SMN, n.d.).

A continuación, el modelo es implementado para dos edificaciones, una de ellas con azotea convencional y la otra con azotea verde. Para cada sistema se estudian dos diferentes casos, en el

primer caso se desprecia la transferencia de calor a través de las paredes, consideración realizada por la mayoría de los modelos matemáticos. En el segundo caso, se considera la transferencia de calor a través de las paredes y además se considera que dos de ellas reciben radiación solar a lo largo del día. Para estos dos casos de estudio, se utilizan los datos de las **Tablas 5.1** y **5.2**, así como los datos meteorológicos para un día de verano en la Ciudad de México (**Figs. 6.1** y **6.2**). Para un edificio con azotea convencional la temperatura promedio de la azotea no tiene cambios significativos al considerar o despreciar la transferencia de calor a través de las paredes, sin embargo, la temperatura interna puede diferir en más de 30°C como se muestra en la **Fig. 6.3**. Se puede ver que la temperatura interior es mayor cuando no se considera la transferencia de calor a través de las paredes, aun cuando se considera que en dos de las paredes incide radiación solar en diferentes horas del día. La temperatura interior es menor cuando se considera la transferencia de calor a través de las paredes debido a que se tiene una mayor área de transferencia de calor. Es decir, dos envoltentes reciben radiación solar, transfiriendo el calor al interior, mientras que las otras 3 envoltentes (con mayor área) transfieren el calor interior de la edificación hacia el exterior.

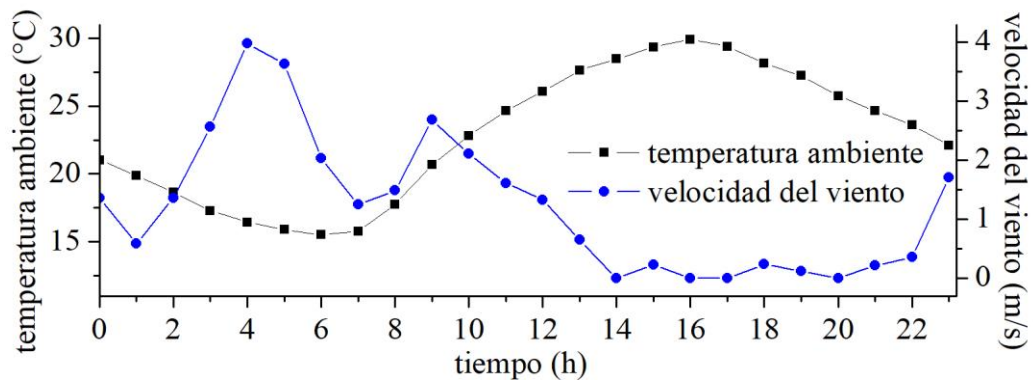


Fig. 6.2. Temperatura ambiente y velocidad del viento para un día cálido en la Ciudad de México (SMN, n.d.).

Para un edificio con azotea verde, la temperatura promedio de la capa verde no se ve afectada al considerar o no la transferencia de calor a través de las paredes. Sin embargo, se comienza a ver pequeñas diferencias en la temperatura promedio de la capa de sustrato, la diferencia de temperaturas se hace más notoria en el elemento constructivo. La temperatura interna puede llegar a diferir en poco más de 5°C como se muestra en la **Fig. 6.4**.

Por lo tanto, aun que la transferencia de calor a través de las paredes de la edificación no tiene un impacto relevante en la temperatura superficial de la azotea, sí tiene un efecto importante en la temperatura interna, que es indispensable en el confort térmico y por lo tanto en el ahorro de energía.

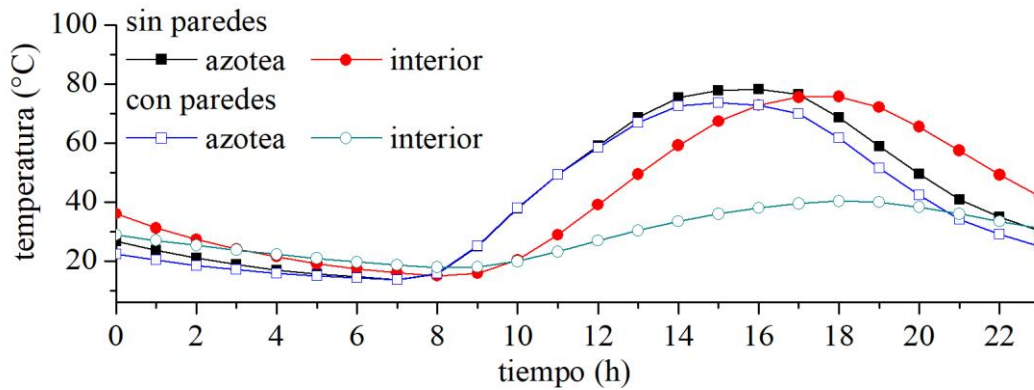


Fig. 6.3. Comparación del perfil de temperatura para un edificio con azotea convencional para dos casos. El primer caso despreciando la transferencia de calor a través de las paredes y el segundo caso considerando la transferencia de calor a través de éstas.

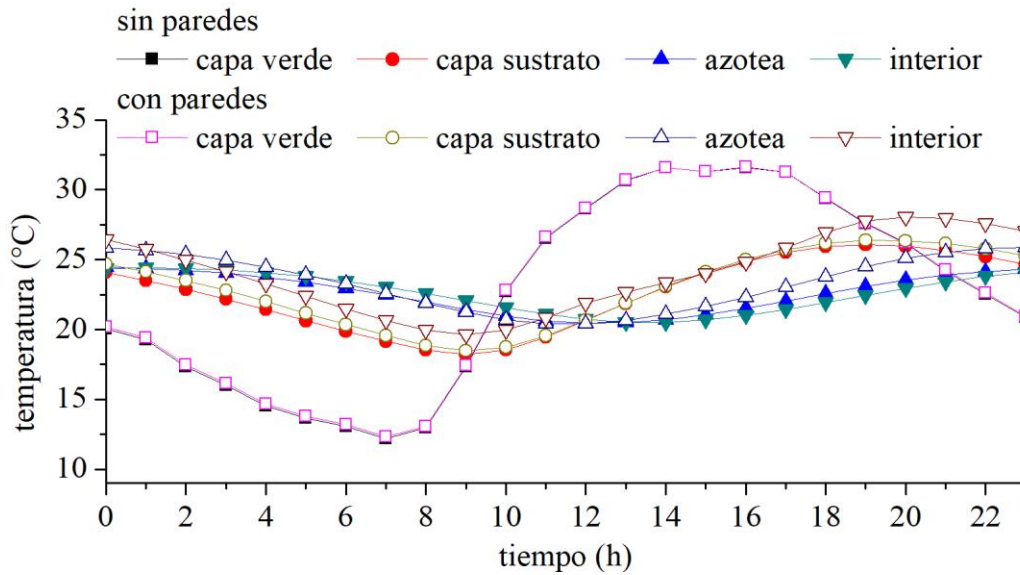


Fig. 6.4. Comparación del perfil de temperatura para un edificio con azotea verde para dos casos. El primer caso despreciando la transferencia de calor a través de las paredes y el segundo caso considerando la transferencia de calor a través de éstas.

Debido al importante efecto que tiene la transferencia de calor a través de las paredes sobre la temperatura interna, todos los casos de estudio presentados a continuación consideran este flujo de calor.

En la **Fig. 6.5** se muestra la temperatura promedio para los elementos envolventes de una edificación con azotea convencional. En la **Fig. 6.6** se muestra la temperatura promedio para los elementos envolventes de una edificación con azotea verde. Al comparar las **Figs. 6.5** y **6.6** se puede ver que la temperatura superficial de la azotea convencional es mucho mayor a la temperatura superficial de la azotea verde, la temperatura interna también difiere en los dos casos, con la azotea verde se tiene una menor amplitud de la oscilación de la temperatura como se puede apreciar con mayor detalle en la **Fig. 6.7**.

Como se muestra en la **Fig 6.7**, las azoteas verdes pueden contribuir a reducir la temperatura interna de la edificación hasta 12°C en comparación con azoteas convencionales. Esto debido a que proporcionan un efecto de enfriamiento significativo durante el verano o en regiones con clima cálido (Lei et al., 2019; Pandey et al., 2012; Yang et al., 2015; Yuan & Rim, 2018). Lo anterior puede contribuir a alcanzar la temperatura de confort térmico y por tanto reducir el consumo de energía por climatización en las edificaciones (Ascione, 2017).

Los resultados obtenidos son consistentes con otras investigaciones que afirman que las azoteas verdes son una solución para mitigar las oscilaciones de temperatura interna de las edificaciones (Melo dos Santos et., 2019). Como se muestra en la **Fig. 6.7**, la temperatura interna de la edificación con azotea verde oscila entre 20°C y 27°C, mientras que para la edificación con azotea convencional oscila entre 18°C y 39°C.

La decisión de instalar un tipo particular de azotea verde debe tomarse durante la etapa de diseño de un proyecto debido a los diferentes costos y los beneficios que ofrece cada tipo de azotea verde (Mahdiyar et al., 2019). Se debe de tener en cuenta las condiciones climáticas, así como la escala y el entorno de la edificación (Dahanayake and Chow, 2018). El modelo matemático, desarrollado en el presente trabajo, se puede usar durante la etapa de diseño de una edificación, considerando su escala y el entorno, para evaluar el comportamiento térmico de la azotea verde operando bajo diferentes condiciones climáticas.

A continuación, se presentan los casos de estudio realizados para una semana de las diferentes condiciones climáticas de la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila.

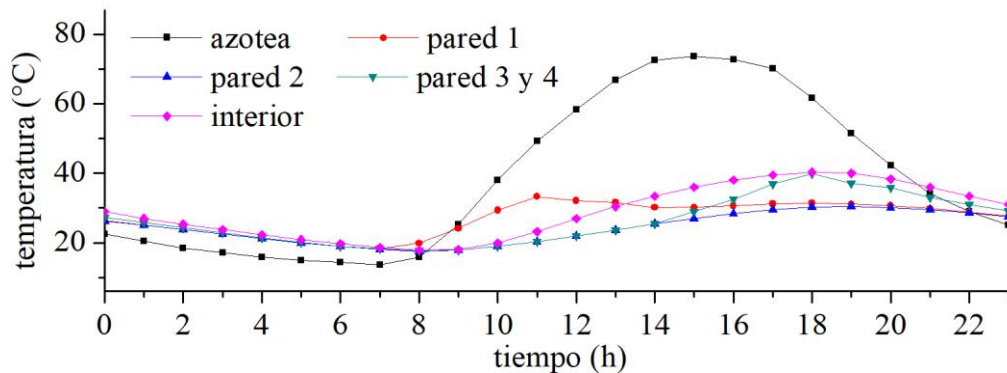


Fig. 6.5. Distribución de temperaturas para el edificio con techo convencional.

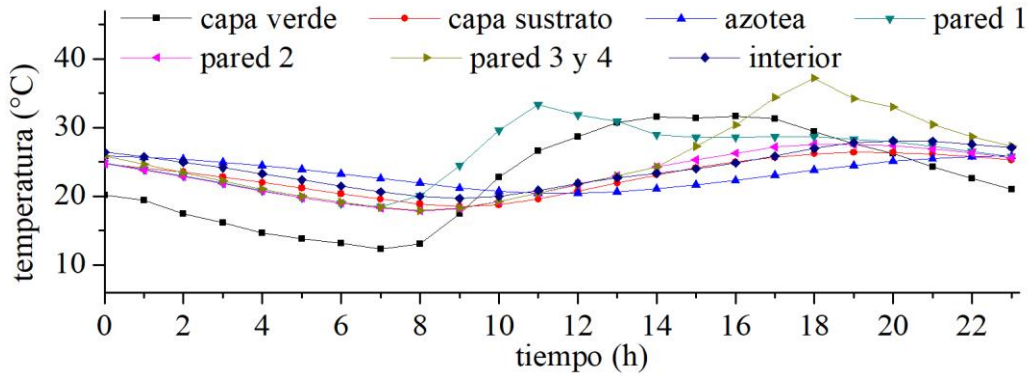


Fig. 6.6. Distribución de temperaturas para el edificio con techo verde.

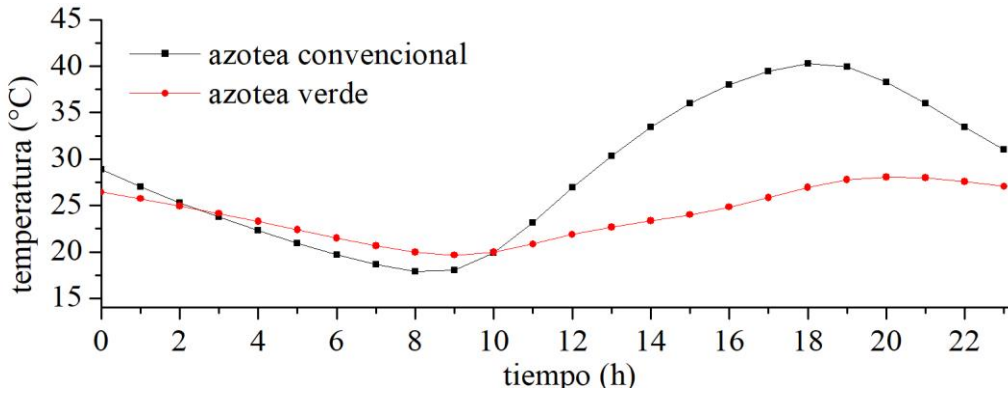


Fig. 6.7. Comparación de la temperatura interior del edificio con techo convencional y techo verde.

En las **Figs. 6.8 a 6.10** se muestran los promedios por cada hora de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento registrada en la Ciudad de México durante una semana (9 de junio de 2019-15 de junio de 2019).

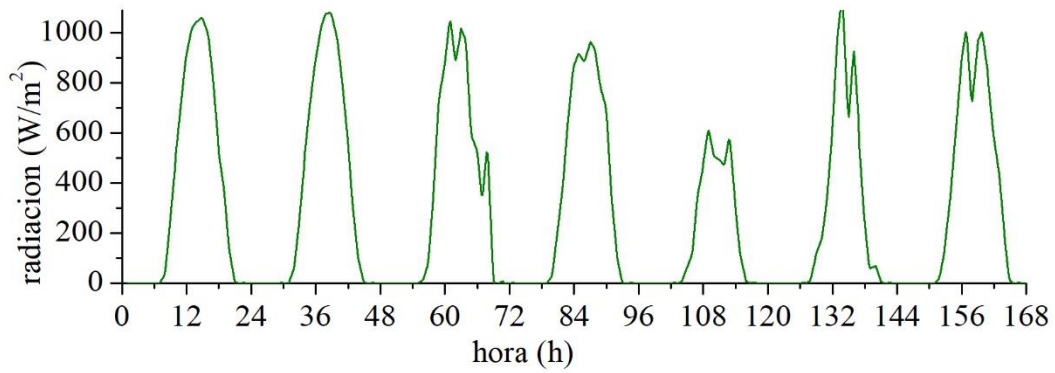


Fig. 6.8 Promedios de la radiación solar durante una semana en la delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México.

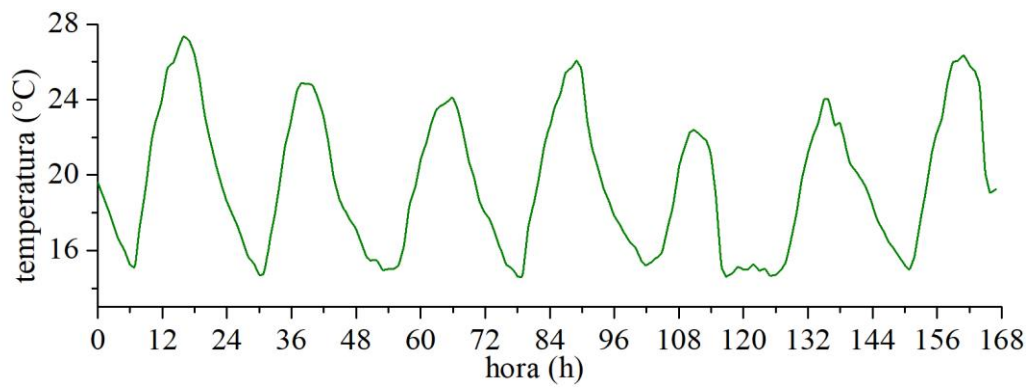


Fig. 6.9 Promedios de la temperatura ambiente durante una semana en la delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México.

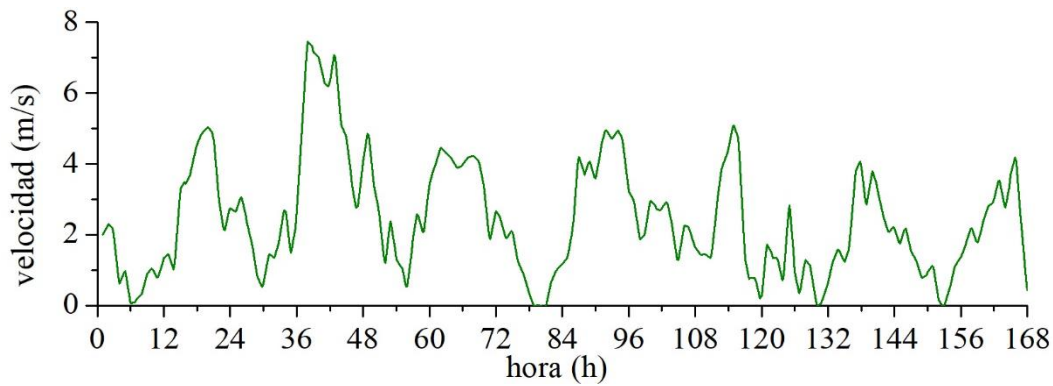


Fig. 6.10 Promedios de la velocidad del viento durante una semana en la delegación Miguel Hidalgo, Ciudad de México.

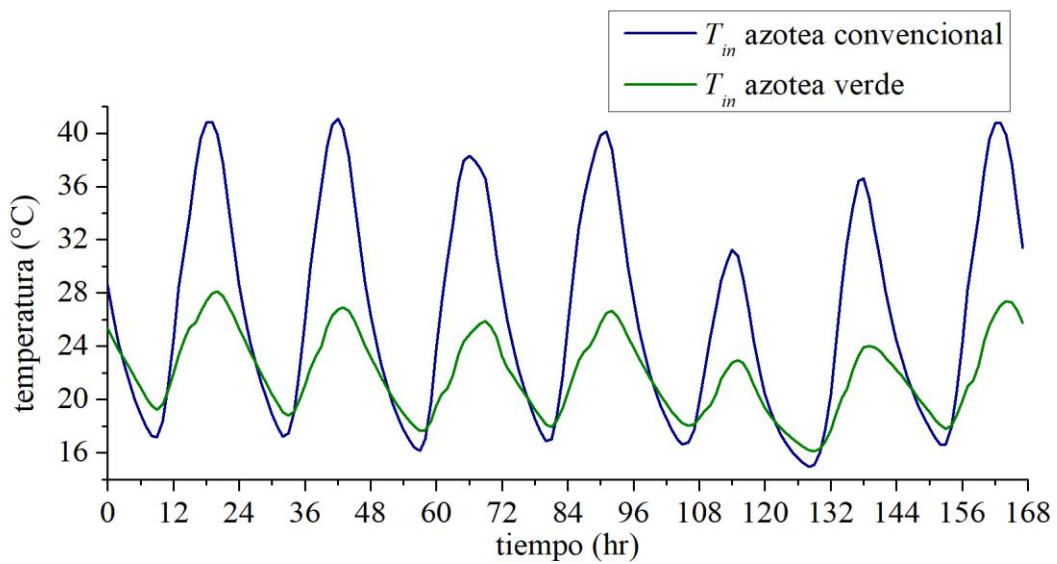


Fig. 6.11 Comportamiento de la temperatura interior de una edificación con azotea convencional vs una edificación con una azotea verde en la Ciudad de México.

La temperatura máxima que se alcanza en el interior de la edificación con azotea convencional es de 41.09°C a las 18:00 hrs el día 10 de junio de 2019, mientras que la temperatura mínima es obtenida el día 4 de junio a las 8:00 hrs con un valor de 14.96°C, por lo tanto la amplitud de la oscilación de la temperatura interior es alrededor de 26°C. Mientras que la temperatura máxima en el interior de la edificación con azotea verde es de 28.12°C a las 20:00 del día 8 de junio de 2019,

la temperatura mínima se da el día 14 de junio de 2019 a las 9:00 hrs y tiene un valor de 16.1°C, por lo tanto la amplitud de la oscilación de la temperatura interior es de 12°C, aproximadamente. Con estos resultados se puede comprobar que las azoteas verdes contribuyen a disminuir la amplitud de la oscilación de la temperatura interior de la edificación, esta disminución puede acercar al usuario a las condiciones de confort térmico. Para el territorio mexicano se puede considerar que la temperatura de confort térmico está alrededor de los 22°C. El promedio de la temperatura interior de la edificación con azotea convencional durante la semana de estudio es de 26.41°C, mientras que la temperatura interior de la edificación con azotea verde es de 21.89°C, con este resultado se puede decir que una edificación con azotea verde puede ayudar a alcanzar una temperatura de confort sin la necesidad de usar algún sistema de climatización. A pesar de que la diferencia de promedios es de aproximadamente 4°C se debe tomar en cuenta que la oscilación de temperaturas en el interior de la edificación con azotea convencional es mayor, por lo tanto, si se llega a instalar algún sistema de climatización va a requerir una demanda mayor para que la oscilación de temperaturas sea menor, sin embargo, se deben realizar estudios donde se simule el comportamiento del aire acondicionado para confirmar esto.

Es importante mencionar que estas temperaturas tan elevadas son consecuencia de no considerar la transferencia de masa, es decir en el modelo no se considera el intercambio de aire ambiente y aire interior, además no se consideran efectos de sombreado en las envolventes de la edificación. Esta simplificación se realiza para modelar en un trabajo futuro el uso de un sistema de aire acondicionado.

6.2 Yucatán

En las **Figs. 6.12 a 6.14** se muestran los promedios por cada hora de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento registrada en Yucatán durante una semana (22 de junio de 2019 – 28 de junio de 2019).

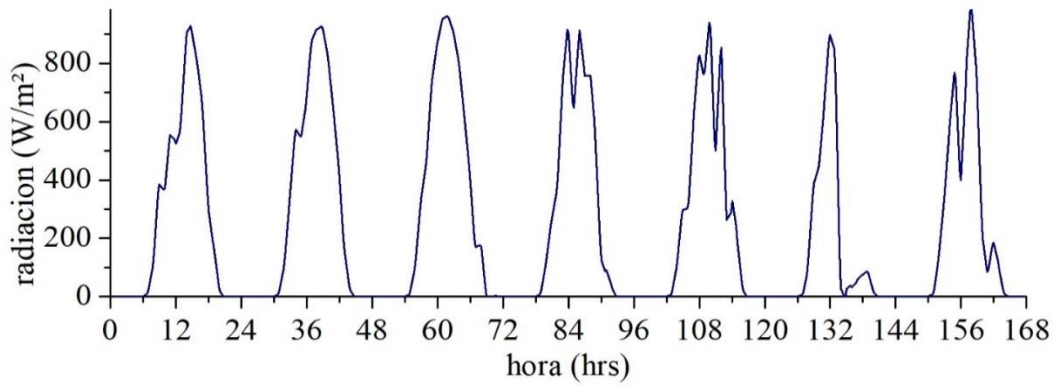


Fig. 6.12 Promedios de la radiación solar durante una semana en el municipio de Valladolid, Yucatán.

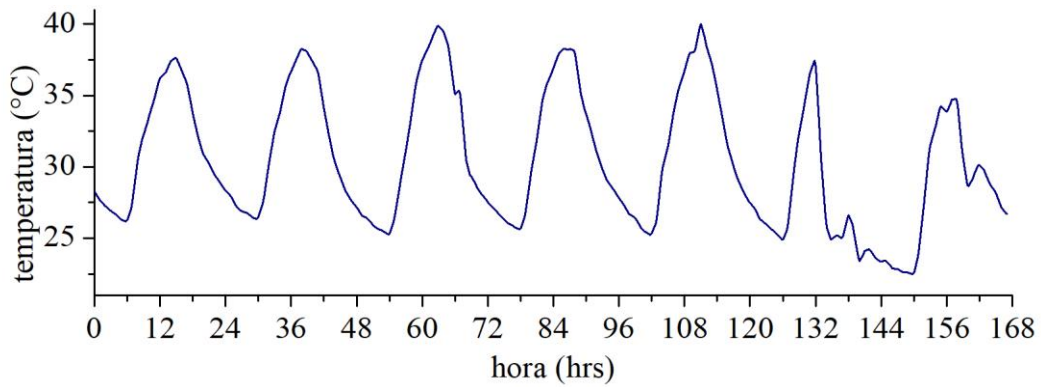


Fig. 6.13 Promedios de la temperatura durante una semana en el municipio de Valladolid, Yucatán.

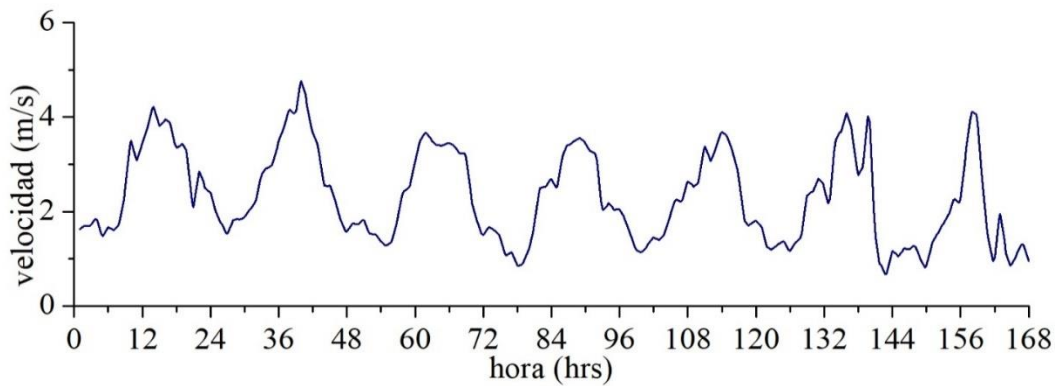


Fig. 6.14 Promedios de velocidad del viento durante una semana en el municipio de Valladolid, Yucatán.

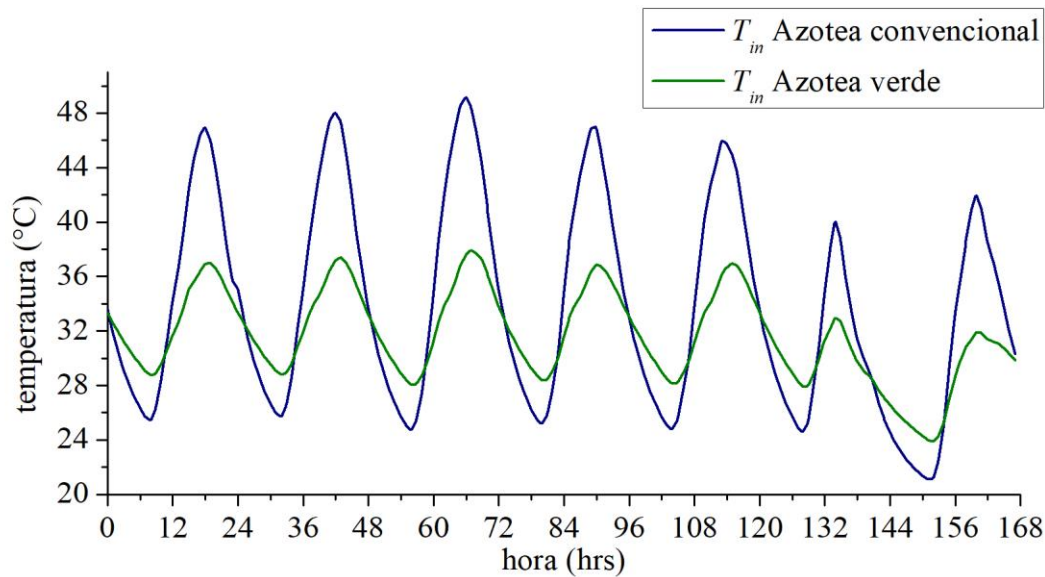


Fig. 6.15 Comportamiento de la temperatura interior de una edificación con azotea convencional vs una edificación con una azotea verde en Yucatán.

La temperatura máxima interior que alcanza la edificación con azotea convencional es de 49.11°C a las 18 hrs el día 28 de junio del 2019, mientras que la temperatura mínima es registrada el día 18 de junio del 2019 a las 7 hrs con 21.09°C, por lo tanto la oscilación de temperatura al interior de la edificación es aproximadamente de 28°C. Mientras que la temperatura máxima interior de la edificación con azotea verde es de 37.91°C obtenida el día 24 de junio a las 19 hrs y la temperatura mínima es obtenida el día 28 de junio del 2019 a las 8 hrs con 23.91°C, por lo tanto, la oscilación de temperaturas es aproximadamente de 14°C. El promedio de la temperatura interior de la edificación con azotea convencional es de 33.79°C, mientras que el promedio de la temperatura interior de una edificación con azotea verde es de 31.65°C, a pesar de que la diferencia de promedios de temperatura de los dos tipos de azotea es de aproximadamente 2°C hay que destacar que la azotea verde ayuda a que la oscilación de temperatura interior baje a la mitad, esto verifica que, aun cambiando las condiciones meteorológicas, las azoteas verdes ayudan a que la temperatura interior de una edificación se acerque al confort térmico sin la necesidad de la instalación de algún equipo de climatización.

Es importante mencionar que estas temperaturas tan elevadas son consecuencia de no considerar la transferencia de masa, es decir en el modelo no se considera el intercambio de aire ambiente y aire

interior, además no se consideran efectos de sombreado en las envolventes de la edificación. Esta simplificación se realiza para modelar en un trabajo futuro el uso de un sistema de aire acondicionado.

6.3 Coahuila

En las **Figs. 6.16 a 6.18** se muestran los promedios por cada hora de la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento registrada en Coahuila durante una semana (3 de julio de 2019 – 9 de julio de 2019).

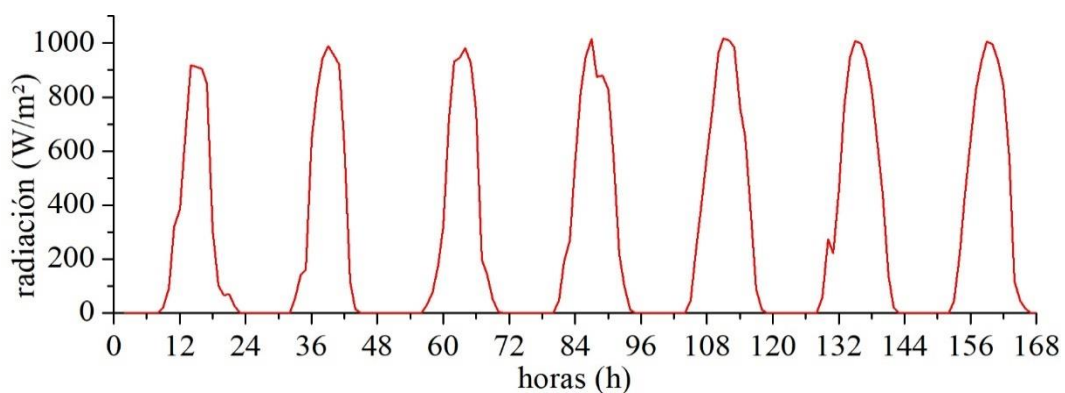


Fig. 6.16 Promedios de la radiación durante una semana en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila.

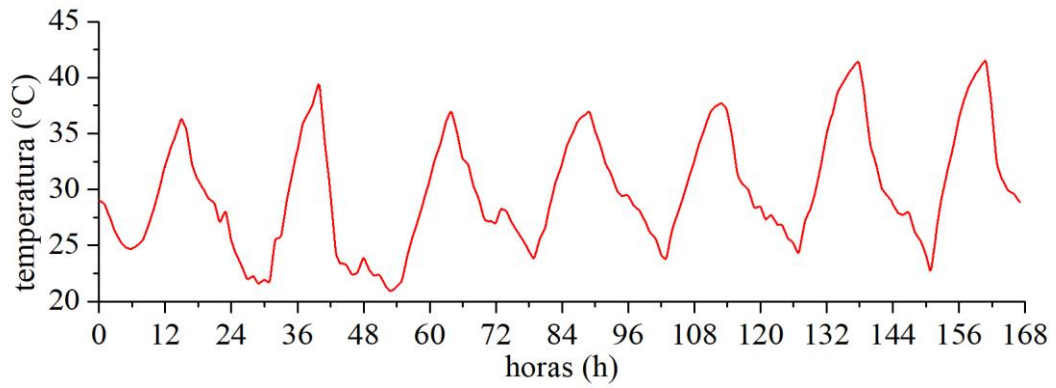


Fig. 6.17 Promedios de la temperatura durante una semana en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila.

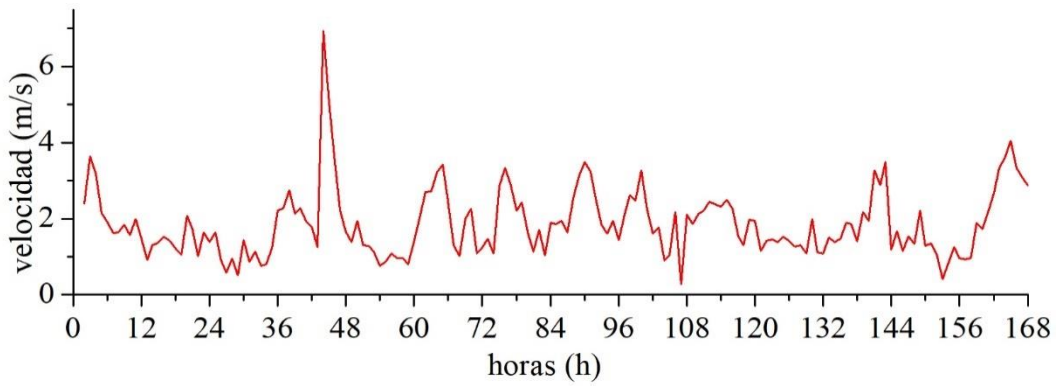


Fig. 6.18 Promedios de la velocidad del viento durante una semana en el municipio de San Juan de Sabinas, Coahuila.

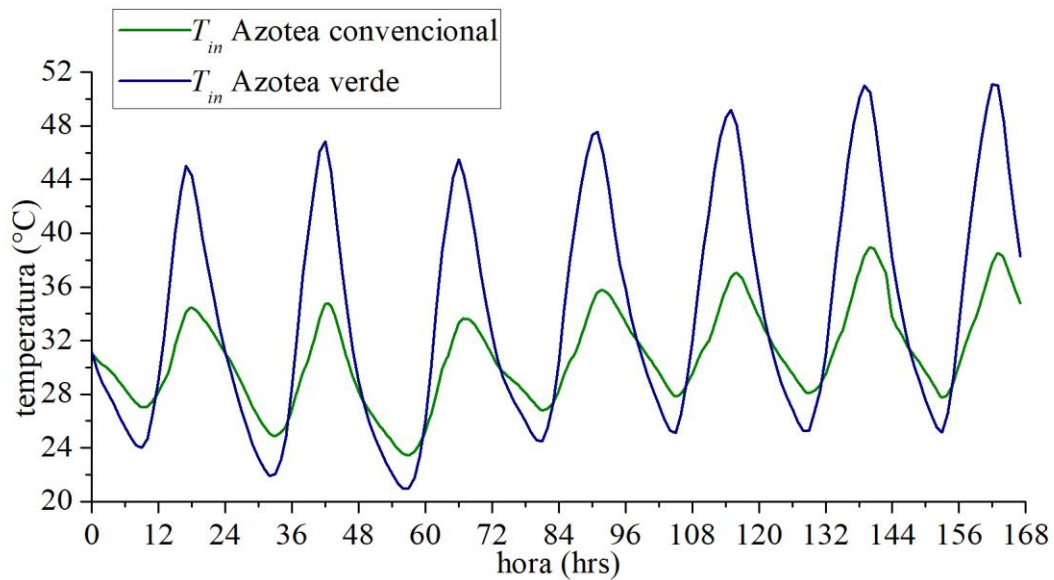


Fig. 6.19 Comportamiento de la temperatura interior de una edificación con azotea convencional vs una edificación con una azotea verde en Coahuila.

La temperatura máxima del interior de la edificación con azotea convencional es de 51.11°C el día 09 de julio del 2019 a las 18 hrs, mientras que la temperatura mínima fue registrada el día 5 de julio del 2019 a las 8 hrs con una temperatura de 20.94°C, por lo tanto, la oscilación de temperaturas es de 30°C aproximadamente. Mientras que la temperatura máxima en la edificación con azotea verde es de 38.95°C el día 8 de julio del 2019 a las 20 hrs, mientras que la temperatura mínima fue registrada el día 5 de julio del 2019 a las 9 hrs con una temperatura de 23.45°C, por lo tanto, la oscilación de temperaturas es aproximadamente de 16°C. En este caso donde la oscilación de temperaturas de la azotea convencional es más grande a comparación de los dos casos anteriores la azotea verde reduce la oscilación de temperaturas un poco más de la mitad, el promedio de la temperatura interior de la edificación con azotea convencional es de 34.07°C, mientras que el promedio de la edificación de la azotea con azotea verde es de 30.84°C una diferencia de 4°C. En este caso en donde se consideró una región geográfica donde las temperaturas llegan a ser tan altas que es necesario tener un sistema de aire acondicionado para poder alcanzar un confort térmico, queda demostrado que la azotea verde ayuda a disminuir la temperatura interior de la edificación. Es posible tener ahorro de energía, ya que, con la operación de un equipo de aire acondicionado, no será necesario que el equipo consuma tanta energía para

alcanzar el confort térmico dentro de una edificación y en un largo plazo el ahorro de energía se vería reflejado en el recibo de consumo eléctrico. Es necesario realizar otros estudios donde se modele el sistema de aire acondicionado para cuantificar el ahorro de energía.

Es importante mencionar que estas temperaturas tan elevadas son consecuencia de no considerar la transferencia de masa, es decir en el modelo no se considera el intercambio de aire ambiente y aire interior, además no se consideran efectos de sombreado en las envolventes de la edificación. Esta simplificación se realiza para modelar en un trabajo futuro el uso de un sistema de aire acondicionado.

Es importante recordar que para el desarrollo del modelo matemático, presentado en este trabajo, se realizaron una serie de simplificaciones, tales como: no considerar ventanas en la edificación, no considerar elementos de sombreado, no considerar la transferencia de masa entre el interior y el exterior de la edificación, entre otras. El modelado, en general, debe de evolucionar con el tiempo, debido a que se debe de partir de un sistema que sea lo más simple posible y verificar su correcto funcionamiento. Posteriormente, se deben de agregar detalles al modelo para que éste pueda describir al sistema real con mayor exactitud. Por lo tanto, el modelo desarrollado en este trabajo está sujeto a mejoras con los cuales se podrán obtener valores más cercanos a los reales. Sin embargo, como se mostró en la sección de validación los resultados son aceptables debido a que el máximo error absoluto en la temperatura de la planta es de 3°C.

7. Conclusiones

En el presente trabajo se analizó el comportamiento térmico de una edificación con azotea convencional y con azotea verde, el estudio fue realizado para la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila, que son ciudades con diferentes condiciones climáticas. Para el estudio, en las tres ciudades, se consideró una edificación sin ventanas donde no hay intercambio de masa con el medio, es decir se consideró como un sistema cerrado.

Con ayuda de la literatura fue propuesto un modelo matemático para estudiar el comportamiento térmico de una edificación con azotea convencional y con azotea verde. El modelo fue implementado en el software Python 3.6.3. Los datos de entrada del modelo matemático son la radiación solar velocidad del viento y temperatura ambiente, en la literatura no se encuentra un modelo matemático que requiera tan pocos datos de entrada y tan fácilmente medibles (Escribir lo del resumen de las variables de entrada para el modelo matemático). Posteriormente se simuló el comportamiento térmico al interior de una edificación con azotea convencional y una azotea verde. Donde se demostró que la azotea verde se comporta como aislante para alcanzar el confort térmico del usuario, es decir, no solo sirve para disminuir la temperatura máxima interior de la edificación, sino también evitar que la temperatura disminuya, esto se puede ver en las **Figs. 6.11, 6.15 y 6.19** donde se comparan las temperaturas internas de la edificación de una azotea convencional y una azotea verde, se demuestra que el comportamiento de la temperatura interna con azotea verde nunca llega a la temperatura interior máxima y mínima de una azotea convencional, incluso en condiciones de temperaturas muy altas. La azotea verde contribuyó a disminuir el promedio de temperatura en las tres ciudades ayudando a alcanzar la temperatura de confort del usuario sin la ayuda de algún equipo de aire acondicionado.

Los resultados que se obtuvieron para los tres casos de estudio muestran que la amplitud de la oscilación de la temperatura interior de la edificación es menor cuando ésta tiene una azotea verde. Por lo tanto, las azoteas verdes pueden contribuir a disminuir el consumo de energía eléctrica en una edificación por climatización. Sin embargo, es necesario realizar un estudio al respecto y cuantificar el ahorro de energía lo cual puede hacerse en un trabajo futuro implementando el modelado de un sistema de aire acondicionado.

Apéndice

A continuación se presenta el programa implementado en Python 3.6.3.

```
##### Propiedades de aire #####
def propiedades(t):
    Pr=2.27795-0.03532*t+(3.0369E-4)*t**2+(-1.24095E-6)*t**3+(2.43578E-9)*t**4+(-1.85632E-12)*t**5
    k=0.00387+7.67E-05*t+-1.33E-08*t**2
    cp=960.625234197808+0.154573092247631*t
    rho=0.000232152997406614+352.780287653039*(1/t)
    miu=(-7.86858E-7)+(8.9293E-8)*t+(-1.05293E-10)*t**2+(7.58869E-14)*t**3
    return Pr,k,cp,rho,miu

def Re(rhoa,vel,Lo,miua):
    Re=(rhoa*vel*Lo)/miua
    return Re

def Nu(Pra,Rea):
    Nu=0.3387*(Pra**0.3333)*Rea**(0.5)/((1+(0.0468/Pra)**0.6667)**0.25)
    return Nu

def qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta):
    hout=Nua*ka/Lo
    qcv=hout*(tfrontera-ta)
    return qcv

def propiedadeseff(rho1,rho2,cp1,cp2,k1,k2,alphaeff): #green
    rhocp = rho1*cp1*(1-alphaeff)+rho2*cp2*alphaeff
    k=k1*(1-alphaeff)+k2*alphaeff
    return rhocp,k
#####

##### Dimensiones del cuarto #####
Lo=4.0 #m          longitud del cuarto
al=3.0 #m          altura
A=Lo**2 #m2
vol = al*A #m3
L=0.3 #m          espesor del techo total. Ya incluida la capa verde, la capa de sustrato y el concreto
deltax=0.03 #m
n=L/deltax+1      #numero de nodos
n=int(n)
#print (n)

##### Lectura de datos #####
archivo=open('cdmx25-48.txt','r')
grad=[0.]*24
for hora in range(24):
    grad[hora]=float(archivo.readline()) #W/m2    radiacion solar para el techo
gradp=[0.]*24
for hora in range(24):
    gradp[hora]=float(archivo.readline()) #W/m2    radiacion solar para las paredes
tamb=[0.]*24
for hora in range(24):
    tamb[hora]=float(archivo.readline()) #K    temperatura ambiente
velv=[0.]*24
for hora in range(24):
    velv[hora]=float(archivo.readline()) #m/s    velocidad del viento
temp=[0.]*n
for nodo in range(n):
    temp[nodo]=float(archivo.readline()) #K    temperatura del techo
tpr=[0.]*n
for nodo in range(n):
```



```

    tpr[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura de la pared que recibe radiacion en la mañana
tsr=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tsr[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura de la pared que no recibe radiacion
tsrc=[0.]*n
for nodo in range(n):
    tsrc[nodo]=float(archivo.readline()) #K temperatura de la pared que recibe radiacion en la tarde
tin=float(archivo.readline()) #K temperatura interior
archivo.close()

#Para el calculo de la evapotranspiracion
tmax=max(tamb)
tmin=min(tamb)
tmedia=tmax-tmin
#tmedia=tmedia

#propiedades del concreto
rhoc=1800. #kg/m3
kc=0.80 #W/mK
cpc=840 #J/kgK

#propiedades del aire
rhoa=1.184 #kg/m3
ka=0.02551 #W/mK
cpa=1007. #J/kgK

#propiedades de la planta green
rhop=582.0
cpp=4800.0 #J/kgK
kp=0.5 #W/m2K
alphaa=0.53
#propiedades de la tierra green
rhot=1200.0 #kg/m3
cpt=840.0 #J/kgK
kt=1.0 #W/mK
#propiedades del agua green
rhoag=1000.0 #kg/m3
cpag=4186.0 #J/kgK
kag=0.58 #W/mK
alphaag=0.26

l=2430000.0

#llamado de las propiedades efectivas green
rhocpcv,kcv=propiedadeseff(rhop,rhoa,cpp,cpa,kp,ka,alphaa) #capa verde
rhocpcs,kcs=propiedadeseff(rhot,rhoag,cpt,cpag,kt,kag,alphaag) #capa de sustrato
#rocpint,kint=propiedades(rot,roai,cpt,cpai,kt,kai,alfaint)

#constante de stefan boltzmann
sig=5.67e-8 #W/m2K4

#calculo de beta techo
alpha=kc/(rhoc*cpc)
deltat=1.2 #s
betac=alpha*deltat/(deltax**2)

#calculo de beta para las plantas green
alphacv=kcv/rhocpcv
betacv=alphacv*deltat/(deltax**2)
#calculo de beta para el sustrato green
alphacs=kcs/rhocpcs
betacs=alphacs*deltat/(deltax**2)

####Condiciones iniciales
tsim=60. *60*1#s ##### Tiempo de simulacion #####
time=0. #s

tsky=273.15+10 #K

```

```

#Declaracion de los arreglos de la temperatura futura
tempf=[0.]*n
tprf=[0.]*n
tsrf=[0.]*n
tsrcf=[0.]*n

h=5. #W/m2K para el interior del cuarto

#techo
emic=1.0 #emisividad del concreto
alphac=0.85 #absortividad del concreto
#pared con radiación
alphapr=0.5 #absortividad de la pared
epr=0.15 #m espesor de la pared
#deltax para la pared
deltaxp=epr/(n-1) #m
betap=alpha*deltat/(deltaxp**2) #beta para la pared
Ap=Lo*al

print('hora tplanta tsustrato ttecho tprad tpsrad tsrcon tin')

for hora in range (24):
    time=0.0
    qsri=grad[hora]
    qsrip=gradp[hora]
    ta=tamb[hora]
    vel=velv[hora]
    if vel > 5:
        vel=5.

#asignacion de nodos a la capa verde y la capa de sustrato
tge=temp[0]
tgs=temp[2]
tse=temp[3]
tss=temp[5]
tce=temp[6]
suma=0.0

#calculando temperaturas promedio
tplanta=(temp[0]+temp[1]+temp[2])/3
tsustrato=(temp[3]+temp[4]+temp[5])/3
ttecho=(temp[6]+temp[7]+temp[8]+temp[9]+temp[10])/5

suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+tpr[j]
tprad=suma/n

suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+tsr[j]
tpsrad=suma/n

suma=0.0
for j in range(n):
    suma=suma+tsrc[j]
tsrcon=suma/n

print(hora,tplanta,tsustrato,ttecho,tprad,tpsrad,tsrcon,tin)
#print(temp[0],temp[n-1])
#print(tplanta-273.15)
while time < tsim:
    i=0
    while i <= n-1:
        #seleccion del valor de beta para el material green
        if i <=2:
            beta=betacv
        elif i>2 and i<=5:
            beta=betacs

```

```

else:
    beta=betac
#####
if i == 0:
#####
#                               Techo   Green Roof
#####
#conveccion
qcv=(5.7+3.8*vel)*(temp[i]-ta)    #green
#radiacion techo
qsrt=alphac*qsri
#emision techo
qemt=emic*sig*(temp[i]**4-tsky**4)
qemt=emic*sig*(temp[i]**4-(ta-15)**4)
#evapotranspiracion
ret=5.2189874955193E-07*0.0023*qsri*(ta-273.15+17.8)*tmedia**0.5 #se ajusta mejor
Hargreaves (1985)
get=ret*1
#fotosintesis
qps=0.16*qet
#fuentes
fuentest=qsrt-qemt-qcv-qet-qps
tempf[i]=temp[i]+deltax*fuentest/kp
#####
#####                               Pared con radiacion
#####
#conveccion
tf=(tpr[i]+ta)/2
Pra,ka,cpa,rhoa,miua=propiedades(tf)
Rea=Re(rhoa,vel,Lo,miua)
Nua=Nu(Pra,Rea)
tfrontera=tpr[i]
qcvpr=qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta)
#qcvpr=0.0
#radiacion pared
qsrpr=alphapr*qsrip
if hora >=14:
    qsrpr=0.0
#emision pared
qempr=emic*sig*(tpr[0]**4-ta**4)
#fuentes
fuentep=qsrrpr-qempr-qcvpr
#tprf[i]=tpr[i]+deltat*fuentep/(epr*rhoc*cpc) #temperatura para la pared que
recibe radiacion
tprf[i]=tpr[i]+deltax*fuentep/kc
#####
#####                               Pared sin radiacion
#####
#conveccion pared SIN radiacion
tf=(tsr[i]+ta)/2
Pra,ka,cpa,rhoa,miua=propiedades(tf)
Rea=Re(rhoa,vel,Lo,miua)
Nua=Nu(Pra,Rea)
tfrontera=tsr[i]
qcvpr=qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta)
#emision pared SIN radiacion
qempr=emic*sig*(tsr[i]**4-ta**4)
#fuentes pared SIN radiacion
fuentesr=-qempr-qcvpr
#calculo de temperatura para la pared SIN radiacion
#tsrf[i]=tsr[i]+deltat*fuentesr/(epr*rhoc*cpc)
tsrf[i]=tsr[i]+deltax*fuentesr/kc
#####
#####                               Pared con radiacion (opuesta)
#####
tf=(tsrc[i]+ta)/2
Pra,ka,cpa,rhoa,miua=propiedades(tf)
Rea=Re(rhoa,vel,Lo,miua)
Nua=Nu(Pra,Rea)

```

```

tfrontera=tsrc[i]
qcvpsrc=qcv(Nua,ka,Lo,tfrontera,ta)
qsrsrc=alphapr*qsrip
if hora <= 13:
    qsrsrc=0.0
    gemsrc=emic*sig*(tsrc[i]**4-ta**4)
    fuentesrc=qsrsrc-gemsrc-qcvpsrc
    #calculo de temperatura para la pared SIN radiacion
    #tsrcf[i]=tsrc[i]+deltat*fuentesrc/(epr*rhoc*cpc)
    tsrcf[i]=tsrc[i]+deltaxp*fuentesrc/kc
elif i >0 and i < n-1:
    tempf[i]=temp[i]+beta*(temp[i+1]-2*temp[i]+temp[i-1]) #techo
    tprf[i]=tpr[i]+betap*(tpr[i+1]-2*tpr[i]+tpr[i-1]) #pared con radiacion
    tsrf[i]=tsr[i]+betap*(tsr[i+1]-2*tsr[i]+tsr[i-1]) #pared sin radiacion
    tsrcf[i]=tsrc[i]+betap*(tsrc[i+1]-2*tsrc[i]+tsrc[i-1])#pared sin radiacion ni
conveccion
else:
    tempf[i]=(deltax*h*tin+kc*tempf[i-1])/(deltax*h+kc) #convección
    tprf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tprf[i-1])/(deltaxp*h+kc) #pared con radiacion
    tsrf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tsrf[i-1])/(deltaxp*h+kc) #pared sin radiacion
    tsrcf[i]=(deltaxp*h*tin+kc*tsrcf[i-1])/(deltaxp*h+kc) #pared sin radiacion ni
conveccion
    i=i+1
    time=time+deltat
    #Actualizacion de las temperaturas
    temp=tempf #techo
    tpr=tprf #pared con radiacion
    tsr=tsrf #pared sin radiacion
    tsrc=tsrcf
    #calculo del calor transferido al interior del cuarto
    flux=-kc*(temp[n-1]-temp[n-2])/deltax #techo
    fluxp=-kc*(tpr[n-1]-tpr[n-2])/deltaxp #pared con radiacion
    fluxsr=-kc*(tsr[n-1]-tsr[n-2])/deltaxp #pared sin radiacion
    fluxsrc=-kc*(tsrc[n-1]-tsrc[n-2])/deltaxp #pared sin radiacion ni conveccion
    Q=A*flux+Ap*fluxp+2*Ap*fluxsr+Ap*fluxsrc #calor transferido al interior del cuarto
    Pra,ka,cpa,rhoa,miaa=propiedades(tin) #propiedades el aire en el interior
    tin = tin + deltat*Q/(vol*rhoa*cpa) #temperatura interior
    Rtecho=(temp[0]-temp[n-1])/flux
    Rtecho1=(tamb[hora]-tin)/flux
    #print(Rtecho,Rtecho1)
##### Foto #####
entrada=open('cdmx25-48.txt','w')

for hora in range(24):
    print(quad[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(quadp[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(tamb[hora],file=entrada)
for hora in range(24):
    print(velv[hora],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(temp[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tpr[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tsr[nodo],file=entrada)
for nodo in range(n):
    print(tsrc[nodo],file=entrada)
print(tin,file=entrada)
entrada.close()
#####
#grafica=open('grafica.txt','w')
#for nodo in range(n):
#    print(nodo,temp[nodo],tpr[nodo],tsr[nodo],tsrc[nodo],file=grafica)
#grafica.close()
#####

```

Estructura del input

- Radiación de la azotea (24 horas).
- Radiación de la pared (24 horas).
- Temperatura ambiente (24 horas).
- Velocidad del viento (24 horas).
- Temperatura del techo (11 nodos).
- Temperatura de la pared (11 nodos).
- Temperatura de pared sin radiación (11 nodos).
- Temperatura de la pared contraria con radiación (11 nodos).
- Temperatura interior.

Nomenclatura

A_i	Área del elemento envolvente i
C_p	Calor específico
L	Longitud de la envolvente paralela al flujo de aire
Nu	Número adimensional de Nusselt
Pr	Número adimensional de Prandtl
\dot{Q}	Calor neto que se transfiere al interior del edificio a través de los elementos envolventes
R_{ep}	Tasa de evaporación
R_{et}	Tasa de evapotranspiración
R_{tp}	Tasa de transpiración
Re	Número adimensional de Reynolds
T_{exs}	Temperatura de la superficie exterior
T_a	Temperatura del aire en el exterior,
T_e	Temperatura de los alrededores
T_g	Temperatura de la capa verde
T_i	Temperatura en la superficie del elemento envolvente i
T_{in}	Temperatura del aire contenido en el interior del edificio
T_{ins}	Temperatura de la superficie interior (sea la pared o el techo)
T_s	Temperatura del sustrato
T_{sky}	Temperatura cielo
T_R	Diferencia de la máxima y la mínima temperatura ambiente alcanzadas durante el día
T_t	Temperatura del techo
TC	Coeficiente de transpiración
ef	Propiedad efectiva
h	Coeficiente convectivo de transferencia de calor
h_{in}	Coeficiente combinado de transferencia de calor en el interior del edificio

k	Conductividad térmica
m	Masa de aire contenida en el interior del edificio
q_{cv}	Calor transferido por convección de la capa verde al exterior
q_{cv}	Calor transferido por convección de la capa verde al exterior
q_{em}	Calor por la radiación neta emitida
q_{et}	Calor transferido por evapotranspiración al ambiente
q_{ps}	Calor neto requerido por las plantas para la fotosíntesis y la respiración
q_{sr}	Calor debido a la radiación de onda corta
q_{sri}	Radiación de onda corta incidente
t	Tiempo
v	Velocidad promedio del viento
x	Dirección de transferencia de calor por conducción
α	Absortividad de la superficie exterior del techo
β	Fracción volumen que ocupa el componente
γ	Espesor de la envolvente
ε	Emisividad
λ	Calor latente de vaporización
μ	Viscosidad dinámica de aire
ρ	Densidad
σ	Constante de Stefan-Boltzmann,

Referencias

-
- Ascione, F., 2017. Energy conservation and renewable technologies for buildings to face the impact of the climate change and minimize the use of cooling. *Sol. Energy* 154, 34–100. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.01.022>.
- Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinnob, K., 2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecol. Eng.* 35, 369–380.
- Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B., 2010. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy Build.* 42, 1582–1591.
- Cengel A.Y., 2007. *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico*; McGraw-Hill.
- Churchill, S.W., Ozoe, H., 1973. 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, 78–84.
- Clark, C., Adriaens, P., Talbot, B., 2008. Green Roof Valuation: A Probabilistic Economic Analysis of Environmental Benefits. *Environ. Sci. Technol.* 42, 2155–2161.
- Dahanayake, K.C., Chow, C.L., 2018. Comparing reduction of building cooling load through green roofs and green walls by EnergyPlus simulations. *Build. Simul.* 11, 421–434. <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0415-7>.
- Evangelisti, L., Guattari, C., Asdrubali, F., 2019. On the sky temperature models and their influence on buildings energy performance: A critical review. *Energy Build.* 183, 607–625. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.11.037>.
- Feng, C., Meng, Q., Zhang, Y., 2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy Build.* 42, 959–965.

- Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Wichman, I.S., 2011. Seasonal heat flux properties of an extensive green roof in a Midwestern U.S. climate. *Energy Build.* 43, 3548–3557.
- Hargreaves, G.H., Asce, F., Allen, R.G., 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *J. Irrig. Drain. Eng.* 129, 53–63. <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94372003129:153>.
- Hong, T., Kim, J., Koo, C., 2012. LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy Build.* 45, 229–239.
- Kosareo, L., Ries, R., 2007. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Build. Environ.* 42, 2606–2613.
- Li, J. -F., Wai, O.W.H., Li, Y.S., Zhan, J. -m., Ho, Y.A., Li, J., Lam, E., 2010. Effect of green roof on ambient CO₂ concentration. *Build. Environ.* 45, 2644–2651.
- Lin, C.Y., Chen, F., Huang, J.C., Chen, W.C., Liou, Y.A., Chen, W.N., Liu, S.C., 2008. Urban heat island effect and its impact on boundary layer development and land–sea circulation over northern Taiwan. *Atmos. Environ.* 42, 5635–5649.
- Lei, K.-T., Tang, J.-S., Chen, P.-H., 2019. Numerical simulation and experiments with green roofs for increasing indoor thermal comfort. *J. Chinese Inst. Eng.* 42, 346–356. <https://doi.org/10.1080/02533839.2019.1585207>.
- Madre, F., Vergnes, A., Machon, N., Clergeau, P., 2013. A comparison of 3 types of green roof as habitats for arthropods. *Ecol. Eng.* 57, 109–117.
- Mahdiyar, A., Tabatabaee, S., Durdyev, S., Ismail, S., Abdullah, A., Wan Mohd Rani, W.N.M., 2019. A prototype decision support system for green roof type selection: A cybernetic fuzzy ANP method. *Sustain. Cities Soc.* 48, 101532. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2019.101532>.
- Melo dos Santos, S., Fernandes Ferreira Silva, J., Chaves dos Santos, G., Martins Torres de

- Macedo, P., Gavazza, S., 2019. Integrating conventional and green roofs for mitigating thermal discomfort and water scarcity in urban areas. *J. Clean. Prod.* 219, 639–648.
- Meng, Q.L., Zang, Y., Zang, L., 2006. Measurement of the equivalent thermal resistance of rooftop lawns in a hot-climate wind tunnel. *J. Harbin Inst. Technol. (New Ser.)* 13, 53–56.
- Mentens, J., Raes, D., Hermy, M., 2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landsc. Urban Plan.* 77, 217–226.
- Onmura, S., Matsumoto, M., Hokoi, S., 2001. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy Build.* 33, 653–666.
- Pandey, S., Hindoliya, D.A., mod, R., 2012. Artificial neural network for prediction of cooling load reduction using green roof over building in Sustainable City. *Sustain. Cities Soc.* 3, 37–45. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2012.01.003>
- Parizotto, S., Lamberts, R., 2011. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. *Energy Build.* 43, 1712–1722.
- Quezada-García, S., Espinosa-Paredes, G., Escobedo-Izquierdo, M.A., Vázquez-Rodríguez, A., Vázquez-Rodríguez, R., Ambriz-García, J.J., 2017. Heterogeneous model for heat transfer in Green Roof Systems. *Energy Build.* 139, 205–213.
- Renterghem, T.V., Botteldooren, D., 2009. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Build. Environ.* 44, 1081–1087.
- Sailor, D.J., 2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy Build.* 40, 1466–1478.
- Saito, I., Ishihara, O., Katayama, T., 1990. Study of the effect of green areas on the thermal environment in an urban area. *Energy Build.* 15, 493–498. <https://doi.org/10.1016/0378->

7788(90)90026-F

Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., Pressnail, K., 2006. Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environ. Sci. Technol.* 40, 4312–4316.

Santamouris, M., 2014. Cooling the cities - A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Sol. Energy* 103, 682–703.

SMN, conagua, n.d. Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) [WWW Document]. URL <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> (accessed 8.29.19).

Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J., Smith, C.L., 2013. Rainwater runoff retention on an aged intensive green roof. *Sci. Total Environ.* 461, 28–38.

Stovin, V., Vesuviano, G., Kasmin, H., 2012. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *J. Hydrol.* 414–415, 148–161.

Takebayashi, H., Moriyama, M., 2007. Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island. *Build. Environ.* 42, 2971–2979.

Theodosiou, T.G., 2003. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy Build.* 35, 909–917.

Weng, Q., Yang, S., 2004. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *J. Environ. Manage.* 70, 145–156.

Wilmers, F., 1988. Green for melioration of urban climate. *Energy Build.* 11, 289–299. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90045-X](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90045-X)

Wong, J.K.W., Lau, L.S. –K., 2013. From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of



Hong Kong. *Habitat Int.* 39, 25–35.

Wong, N.H., Chen, Y., 2005. Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat Int.* 29, 547–558.

Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., Sia, A., 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Build. Environ.* 38, 261–270.

Xing, L., Cullin, J.R., Spitler, J.D., 2012. Modeling of foundation heat exchangers-Comparison of numerical and analytical approaches Article History. *Build. Simul.* 5, 267–279. <https://doi.org/10.1007/s12273-012-0088-1>

Yang, J., Yu, Q., Gong, P., 2008. Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmos. Environ.* 42, 7266–7273.

Yang, W., Wang, Z., Cui, J., Zhu, Z., Zhao, X., 2015. Comparative study of the thermal performance of the novel green (planting) roofs against other existing roofs. *Sustain. Cities Soc.* 16, 1–12. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2015.01.002>.

Ye, X., Luo, Y., Gao, X., Zhu, S., 2012. Design and evaluation of a thermochromic roof system for energy saving based on poly(N-isopropylacrylamide) aqueous solution. *Energy Build.* 48, 175–179. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2012.01.024>.

Yuan, S., Rim, D., 2018. Cooling energy saving associated with exterior greenery systems for three US Department of Energy (DOE) standard reference buildings Article History. *Build. Simul.* 11, 625–631. <https://doi.org/10.1007/s12273-018-0427-y>

Zinzi, M., Agnoli, S., 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy Build.* 55, 66–76.