



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
Energía–Diseño Bioclimático

POTENCIAL DE AHORRO DE ENERGÍA, POR ENFRIAMIENTO, DE LAS
AZOTEAS VERDES EXTENSIVAS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO Y
VERACRUZ

PRESENTA:
MORALES VÁZQUEZ HUGO

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

TUTOR
DR. SERGIO QUEZADA GARCÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX., A 29 DE JULIO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Nelson Edelstein Pamela Fran

Secretario: M. en C. Salazar Salazar Edgar

1 er. Vocal: Dr. Quezada García Sergio

2 do. Vocal: M.I. Navarro Gómez Judith Catalina

3 er. Vocal: Dr. Polo Labarrios Marco Antonio

Lugar donde se realizó la tesis: Facultad de Ingeniería

TUTOR DE TESIS

DR. SERGIO QUEZADA GARCÍA



FIRMA

Agradecimientos

A la UNAM por la educación proporcionada.

Al CONACYT por la beca proporcionada durante mis estudios.

A mis profesores y sinodales de tesis, Dra. Pamela Fran Nelson Edelstein, M.I. Judith C. Navarro Gómez, M. en C. Edgar Salazar Salazar, Dr. Marco Antonio Polo Labarrios, por sus conocimientos brindados, colaboración y apoyo para concretar este documento.

A toda mi familia.

Resumen

El rápido aumento de la población a nivel mundial, así como el rápido crecimiento económico han incrementado los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, por parte de las actividades antropogénicas, teniendo como consecuencia el fenómeno conocido como calentamiento global. Debido a este rápido aumento de la población urbana, los edificios altos y otros nuevos desarrollos inmobiliarios son construidos a expensas de las áreas verdes resultando en una escasez de la vegetación. Por lo tanto, es necesario buscar o proponer ideas creativas de cómo usar la vegetación para afrontar el fenómeno de isla de calor urbano. Una de estas ideas es la implementación de muros y azoteas verdes en las edificaciones.

La implementación de azoteas verdes puede ser motivada por múltiples beneficios como eficiencia energética, una mejora en la administración del agua de lluvia, la mitigación del efecto de isla de calor urbana, aislación del sonido, captura y secuestro de carbono, proveer de un hábitat natural, así como de un aumento y conservación de la biodiversidad, una mejora en la capacidad del estado anímico de las personas que están alrededor de este tipo de azoteas y una mejora en la estética visual.

Así el presente trabajo determinó el potencial de ahorro de energía eléctrica, por enfriamiento, debido a la implementación de una azotea verde extensiva en edificaciones ubicadas en diferentes zonas climáticas de México (Ciudad de México y Veracruz) por medio de simulación. Además, mediante modelos experimentales se analizó el comportamiento térmico.

El documento está dividido de la siguiente manera, en el Capítulo 1 se presenta una parte introductoria sobre las azoteas verdes.

En el Capítulo 2 se propone un modelo matemático unidimensional de transferencia de calor para los elementos circundantes del edificio, las capas que conforman la azotea verde extensiva y el balance energético del interior del edificio.

El Capítulo 3 presenta los experimentos realizados durante tres periodos para analizar el efecto de las azoteas verdes en las edificaciones de la Ciudad de México, obteniéndose una alta masa térmica, mayores resistencias totales y menores índices de climatización.

En el capítulo 4 se presenta una simulación con el software Revit para determinar el potencial de ahorro de energía eléctrica por enfriamiento para dos casos de estudio, Ciudad de México y Veracruz.

En el Capítulo 5 se presenta una evaluación probabilística de desencadenamiento de un accidente, en este caso un incendio.

En el capítulo 6 se presentan las conclusiones del presente trabajo.

Índice general

Resumen	1
Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
Nomenclatura.....	8
Letras griegas.....	10
Subíndices.....	10
Capítulo 1	11
Introducción.....	11
1.1. Contexto mundial.....	11
1.2. Definición y clasificación de las azoteas verdes.....	12
1.2.1. Selección del tipo de plantas.....	15
1.3. Beneficios	17
1.3.1. Captura y secuestro de carbono.....	18
1.3.2. Administración del Agua	19
1.3.3. Costo.....	19
1.3.4. Mitigación del efecto de la isla de calor urbano.....	20
1.3.5. Biodiversidad y conservación de la naturaleza	20
1.3.6 Aislación del sonido	21
1.3.7 Estado anímico y estética visual.....	21
1.3.8. Consumo de Energía	22
1.4. Normas técnicas	24
1.5. Antecedentes de las azoteas verdes.....	25
1.6. Ámbito Mundial.....	26
1.7. Ámbito Nacional.....	27

1.8. Objetivo	27
Capítulo 2	29
Modelo matemático	29
2.1. Modelo de transferencia de calor para elementos envolventes.....	29
2.2. Balance de energía para el interior del edificio	33
2.3. Modelo de transferencia de calor para la azotea verde	33
2.4. Sistema de aire acondicionado.....	37
2.5. Dimensionamiento	39
2.6. Comportamiento térmico en los edificios	41
2.7. Índices para la evaluación del rendimiento térmico	45
2.7.1. Resistencia térmica equivalente	45
2.7.2. Factor de disminución equivalente.....	45
2.7.3. Factor de climatización	46
Capítulo 3	48
Modelo Experimental	48
3.1. Descripción	48
3.2. Descripción de los experimentos	52
3.3. Datos meteorológicos	55
3.4. Resultados Experimentales	59
3.5. Análisis de los resultados experimentales	62
3.5.1. Determinación de la temperatura de confort.....	62
3.5.2. Calculo del factor de climatización.....	63
3.5.3. Determinación de la resistencia térmica.....	63
Capítulo 4	67
Casos de estudio	67
4.1. Descripción del caso de estudio para la Ciudad de México.....	67
4.2. Condiciones climáticas para el caso de estudio de la Ciudad de México.....	72
4.3. Descripción del caso de estudio para Veracruz, México	73

4.4. Condiciones climáticas para el caso de estudio de Veracruz.....	76
4.5. Resultados	76
4.5.1. Caso de estudio de la Ciudad de México	76
4.5.1.1. Determinación de la carga térmica para el caso de estudio de la Ciudad de México.....	76
4.5.2. Caso de estudio de Veracruz	79
4.5.2.1. Determinación de la carga térmica para el caso de estudio de Veracruz	79
Capítulo 5	83
Evaluación probabilística del riesgo.....	83
Capítulo 6	89
Conclusiones.....	89
Referencias	91

Índice de figuras

Figura 1.1 Las 4 principales capas que tiene una azotea verde.	12
Figura 1.2 Algunas plantas utilizadas en las azoteas verdes	16
Figura 1.3 Algunas azoteas verdes sobre hoteles de la ciudad de Chicago	26
Figura 1.4 Sistema de azotea verde del INFONAVIT	27
Figura 2.1 Flujos de calor en una azotea convencional.	29
Figura 2.2 Condiciones de frontera para el interior y el exterior del edificio.	32
Figura 2.3 Modelo conceptual de una azotea verde con los principales flujos de calor.	35
Figura 2.4 Sistema de acondicionamiento de aire.	38
Figura 2.5 La relación entre PPD y PMV	43
Figura 2.6 Puntos donde se toman la temperatura media de las superficies interior y exterior.	45
Figura 2.7 Nodalización para la azotea convencional y de la azotea verde.	47
Figura 3.1 Ubicación de los modelos experimentales en la alcaldía Iztapalapa (9°20'45.42"N, 99°02'32.97"W)	48
Figura 3.2 Modelos experimentales de concreto.	49
Figura 3.3 Esquema del modelo experimental de la azotea convencional.	50
Figura 3.4 Esquema del modelo experimental de la azotea verde.	51
Figura 3.5 Modelos experimentales con la azotea verde y convencional.	52
Figura 3.6 Recorrido del sol a lo largo de la vivienda	53
Figura 3.7 Identificación de las paredes de los modelos experimentales.	54
Figura 3.8 Esquema del modelo experimental de la azotea verde.	55
Figura 3.9 Radiación solar en el periodo del 23 al 30 de noviembre de 2021.	55
Figura 3.10 Temperatura ambiente en el periodo del 23 al 30 de noviembre de 2021.	56
Figura 3.11 Velocidad del viento en el periodo 23 al 30 de noviembre de 2021.	56
Figura 3.12 Radiación solar en el periodo del 12 al 19 de marzo de 2022.	57
Figura 3.13 Temperatura ambiente en el periodo del 12 al 19 de marzo de 2022	57
Figura 3.14 Velocidad del viento en el periodo del 12 al 19 de marzo de 2022	58
Figura 3.15 Radiación solar en el periodo del 21 al 28 de marzo de 2022.	58
Figura 3.16 Temperatura ambiente en el periodo del 21 al 28 de marzo de 2022	59
Figura 3.17 Velocidad del viento en el periodo del 21 al 28 de marzo de 2022.	59
Figura 3.18 Temperatura interna registrada para los dos modelos experimentales del 23 al 30 de noviembre de 2021.	60
Figura 3.19 Temperatura interna registrada para los dos modelos experimentales para el 12 al 19 de marzo de 2022.	61
Figura 3.20 Temperatura interna registrada para los dos modelos experimentales para el 21 al 28 de marzo de 2022.	62

Figura 4.1 Ubicación de la edificación en la alcaldía Iztapalapa	68
Figura 4.2 Plano arquitectónico de la edificación en la Ciudad de México, planta baja.....	69
Figura 4.3 Plano arquitectónico de la edificación en la Ciudad de México, planta alta.....	70
Figura 4.4 Recorrido del sol a lo largo de la vivienda para el caso de estudio en la Ciudad de México	71
Figura 4.5 Edificación con azotea verde para el caso de estudio en la Ciudad de México en 3D.	72
Figura 4.6 Temperaturas de diseño de enfriamiento para la Ciudad de México.....	72
Figura 4.7 Ubicación de la edificación en el Municipio de Playa Vicente, Veracruz (17°43'27.38" N, 95°40'45.81" W).....	73
Figura 4.8 Plano de la vivienda para el caso de estudio en Veracruz.....	74
Figura 4.9 Recorrido del sol a lo largo de la vivienda para el caso de estudio en Veracruz.....	74
Figura 4.10 Edificación con azotea verde para el caso de estudio en Veracruz en 3D.	75
Figura 4.11 Temperaturas de diseño de enfriamiento para Veracruz.....	76
Figura 5.1. Sistema integrado total.....	84
Figura 5.2. Árbol de eventos	85
Figura 5.3. Árbol de falla del sistema de alarma.....	86
Figura 5.4. Árbol de fallas del sistema salvaguarda.....	86

Índice de tablas

Tabla 1.1 Espesor del suelo de las azoteas verdes.....	13
Tabla 1.2 Clasificación de las azoteas verdes y sus principales características	13
Tabla 1.3 Algunas plantas utilizables en azoteas verdes.....	15
Tabla 2.1 Emisión de calor de electrodomésticos	41
Tabla 2.2 Escala de sensaciones térmicas	42
Tabla 3.1 Espesores de los materiales del modelo experimental con azotea verde.....	49
Tabla 3.2 Propiedades térmicas de los materiales utilizados en los modelos experimentales.	50
Tabla 3.3 Resultados de la temperatura de neutralidad	62
Tabla 3.4 Factor de climatización.....	63
Tabla 3.5 Propiedades del aire a 1 atm	64
Tabla 3.6 Viscosidad cinemática del aire a 77,999.985 Pa	64
Tabla 3.7 Resistencias diarias para el periodo del 23 al 30 de noviembre.....	65
Tabla 3.8 Resistencias diarias para el periodo del 12 al 19 de marzo.....	66
Tabla 3.9 Resistencias diarias para el periodo del 23 al 30 de marzo.....	66
Tabla 4.1 Propiedades térmicas de materiales de la edificación del caso de estudio de la Ciudad de México.....	71
Tabla 4.2 Propiedades térmicas de materiales de la edificación del caso de estudio de Veracruz.....	75
Tabla 4.3 Espesores de los materiales de las edificaciones con azotea verde para los casos de estudio de la Ciudad de México y Veracruz.....	75
Tabla 4.4 Cargas térmicas de enfriamiento para la Ciudad de México.....	77
Tabla 4.5 Temperatura de neutralidad o de confort para cada mes en la Ciudad de México.	78
Tabla 4.6 Horas estimadas por uso del aire acondicionado en la Ciudad de México.	78
Tabla 4.7 Potencial de ahorro de energía eléctrica por aire acondicionado para la Ciudad de México.....	79
Tabla 4.8 Cargas térmicas de enfriamiento para Veracruz.....	80
Tabla 4.9 Temperaturas mensuales de neutralidad o de confort para Veracruz.....	81
Tabla 4.10 Horas estimadas por uso del aire acondicionado para Veracruz.....	81
Tabla 4.11 Potencial de ahorro de energía eléctrica por aire acondicionado para Veracruz.	82
Tabla 5.1. Modo de falla del componente.....	84
Tabla 5.2. Conjuntos mínimos de corte.....	87

Nomenclatura

A	Área	m^2
A_{DU}	Superficie del cuerpo humano	m^2
A_{in}	Amplitud de la temperatura de la superficie interior	$^{\circ}C$
A_{ex}	Amplitud de la temperatura de la superficie exterior	$^{\circ}C$
B	Espesor de la capa verde	m
C	Espesor de la capa de sustrato	m
C_p	Calor específico	$J\ kg^{-1}\ ^{\circ}C$
COP	Coficiente de desempeño térmico	Adimensional
E	Espesor	m
E_{ac}	Energía consumida	$W\ h$
ET	Velocidad de evapotranspiración	$mm\ h^{-1}$
F	Factor de disminución equivalente	Adimensional
f_c	Factor de climatización	Adimensional
f_{cl}	Factor de arropamiento	Adimensional
Gr	Numero de Grashof	Adimensional
G	Aceleración de la gravedad	$m\ s^{-2}$
H	Coficiente convectivo de transferencia de calor	$W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$
\bar{h}	Entalpia del aire	$cal\ kg^{-1}$
I_{cl}	Resistencia térmica de arropamiento	$m^2\ K\ W^{-1}$
K	Conductividad térmica	$W\ m^{-1}\ ^{\circ}C^{-1}$
L_c	Longitud característica	m
LAI	Índice de área foliar	$m^2\ m^{-2}$
M	Tasa de producción metabólica	$W\ m^{-2}$
\dot{m}	Flujo másico	$kg\ s^{-1}$
m	Masa de aire contenida dentro del edificio	kg
N	Numero de mediciones diarias	Adimensional
Un	Numero de Nusselt	Adimensional
P	Perímetro	m
P_a	Presión de vapor	$mm\ Hg$
PMV	Voto medio estimado	Adimensional
PPD	Porcentaje de gente insatisfecha	Adimensional
Pr	Numero de Prandtl	Adimensional
\dot{q}	Flujo de calor	$W\ m^{-2}$
\dot{Q}	Calor transferido al interior del cuarto	W
\dot{Q}_c	Calor removido	W
R	Resistencia térmica unitaria	$^{\circ}C\ m^2\ W^{-1}$
R_t	Resistencia térmica por conducción	$^{\circ}C\ W^{-1}$
R_{total}	Resistencia térmica total	$^{\circ}C\ W^{-1}$
R_{ep}	Tasa de evaporación	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
R_{et}	Tasa de evapotranspiración	$kg\ m^{-2}\ s^{-1}$
R_{TE}	Resistencia térmica equivalente	$^{\circ}C\ m^2\ W^{-1}$

R_{tp}	Tasa de transpiración	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Ra	Numero de Raleigh	Adimensional
Re	Numero de Reynolds	Adimensional
S_k	Fuente de calor en el interior del edificio	W
T	Tiempo	s
T_a	Temperatura del aire	$^{\circ}\text{C}$
t_{ac}	Tiempo de operación del aire acondicionado	s
T_{cl}	Temperatura de superficie de arropamiento	$^{\circ}\text{C}$
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
T_{mrt}	Temperatura radiante media	$^{\circ}\text{C}$
T_n	Temperatura de neutralidad	$^{\circ}\text{C}$
$T_{o,av}$	Temperatura promedio	$^{\circ}\text{C}$
TC	Coeficiente de transpiración	Adimensional
T_r	Temperatura de la envolvente	$^{\circ}\text{C}$
T_R	Diferencia entre la máxima y la mínima temperatura ambiente registradas en un día	K
T_{sky}	Temperatura de cielo	K
U	Coeficiente total de transferencia de calor	$\text{W m}^{-2} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
V	Velocidad del viento	m s^{-1}
V	Volumen	m^3
\dot{W}	Potencia eléctrica	W
Z	Dirección en la cual se lleva a cabo la transferencia de calor	m

Letras griegas

α	Absortividad	Adimensional
β	Coefficiente de expansión volumétrico	K^{-1}
γ	Espesor de la envolvente	m
ε	Emisividad	Adimensional
λ	Calor latente de vaporización	$J\ kg^{-1}$
ρ	Densidad	$kg\ m^{-3}$
σ	Constante de Stefan Boltzman	$W\ m^2\ K^{-4}$
ζ	Fracción del volumen	Adimensional
μ	Viscosidad dinámica del aire	$kg\ m^{-1}\ s^{-1}$

Subíndices

<i>cv</i>	Convección
<i>em</i>	Emisión
<i>ef</i>	Efectiva
<i>et</i>	Evapotranspiración
<i>g</i>	Capa verde
<i>in</i>	Interna
<i>p</i>	Planta
<i>ps</i>	Fotosíntesis
<i>s</i>	Sustrato
<i>sr</i>	Calor ganado por radiación de onda corta
<i>sri</i>	Radiación de onda corta incidente
<i>tp</i>	Transpiración
∞	Ambiente

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto mundial

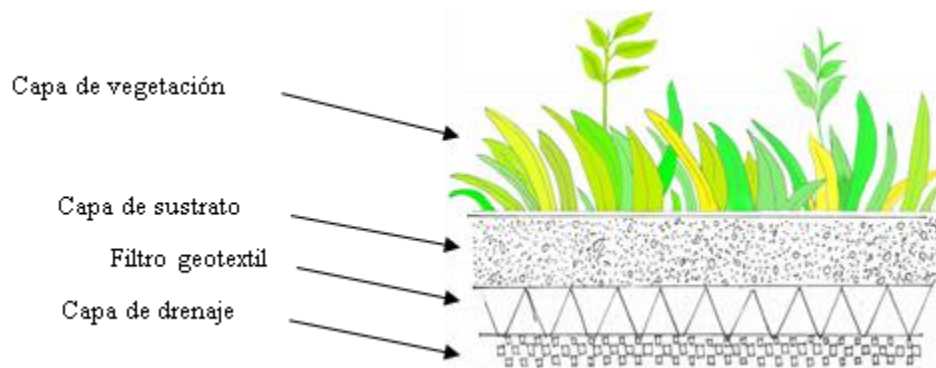
El rápido aumento de la población a nivel mundial, así como el rápido crecimiento económico han incrementado los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, por parte de las actividades antropogénicas, teniendo como consecuencia el fenómeno conocido como calentamiento global. Este fenómeno se ha visto principalmente en el siglo XX y continúa creciendo durante el siglo XXI ([IPCC, 2014](#)).

Debido a esta población urbana amplificada, los edificios altos y otros nuevos desarrollos inmobiliarios son construidos a expensas de las áreas verdes resultando en una escasez de la vegetación, la cual ocasiona un decremento en el agua de lluvia interceptada por la vegetación, esto es un problema catastrófico para países con un caída de agua de lluvia continua y considerable durante el año, una superficie impermeable genera un alto volumen de agua de lluvia y tasas de flujo altas las cuales devastan los sistemas de drenaje convencionales y causan inundaciones considerables ([Gaitan et al., 2016](#); [Yao et al., 2016](#)).

Debido a que la mayor parte de la superficie de las ciudades se encuentra constituida principalmente por concreto y asfalto, es necesario buscar o proponer ideas creativas de cómo usar la vegetación para afrontar el fenómeno de isla de calor urbano. Así mismo, es deseable contar, en las ciudades, con una mayor área para la vegetación verde, así como parques y, en la medida de lo posible, pequeñas plantaciones de árboles ([Vaccari et al., 2013](#)). Un reciente decreto presidencial italiano del 2009 promueve la adopción del uso de las azoteas verdes como una solución, definiéndola a ésta como adecuada al reducir la necesidad de enfriamiento, mitigando las ganancias solares ([Decreto Presidencial Italiano, 2009](#)). La implementación de esta tecnología debe de estar respaldada y apoyada por parte de científicos, servidores públicos y por parte de las autoridades en materia de creación de leyes en el país o en el estado del cual se trate ([Kirchner, 1969](#)).

1.2. Definición y clasificación de las azoteas verdes

Una azotea verde es un sistema que consiste en una capa de vegetación plantada sobre un sistema a prueba de agua que es instalada sobre la superficie de una azotea con una ligera pendiente, las azoteas verdes también son llamadas *techos vegetativos* o *eco-techos* (nps.gov, 2009). Comúnmente la construcción de las azoteas verdes involucra 4 capas: material de drenado, filtro o malla que previene la pérdida de las partículas del suelo, sustrato del suelo y la vegetación, ver [Figura 1.1](#), ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)).



[Figura 1.1](#) Las 4 principales capas que tiene una azotea verde.
Elaboración propia con base en ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)).

El espesor del material de la capa, su composición y el tipo de vegetación muestra gran variación entre diferentes productores y diseñadores. Los requerimientos sobre la azotea que están debajo de la capa vegetal incluyen material a prueba de agua y protección contra la penetración de la raíz ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)). Las azoteas verdes son generalmente clasificadas dentro de 2 grupos; azoteas verdes intensivas y azoteas verdes extensivas ver [Tabla 1.1](#), ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)). Las clasificaciones de las azoteas verdes se basan en el tipo de vegetación, material de construcción, mantenimiento y el uso destinado ([Sun et al., 2013](#)).

Tabla 1.1 Espesor del suelo de las azoteas verdes

Intensivo (mm)	Extensivo (mm)	Fuente
150-1200	50-150	(Kosareo & Ries, 2007)
>500	-	(Köhler et al., 2002)
150-350	30-140	(Mentens et al., 2006)
>100	<100	(Wong et al., 2006)
>300	-	(Bengtsson et al., 2005)
>100	20-100	(P. Graham & M. Kim, 2005)

Elaboración propia con base a (Czemiel Berndtsson, 2010)

Tabla 1.2 Clasificación de las azoteas verdes y sus principales características

Principales atributos	Extensiva	Intensiva	Fuente
Espesor del medio que crece	Debajo de 200 mm	Arriba de 200 mm	(Lanham, 2007)
Accesibilidad	Inaccesible (raíces frágiles)	Accesible (utilizables para propósitos de recreación)	(Lanham, 2007)
Costo	Bajo	Alto	(Bates et al., 2013)
Diversidad de plantas	Baja (moho, hierba y pasto)	Alto (césped o plantas perennes, arbustos y arboles)	(Lanham, 2007) (Dinsdale et al., 2006) (MacIvor et al., 2013)
Construcción	Moderadamente fácil	Técnicamente complejo	(Emilsson, 2008)
Riego	A menudo (no necesaria)	Necesidad de drenaje y sistemas de riego	(Wolf & Lundholm, 2008)
Mantenimiento	Simple	Complicado	(Schweitzer & Erell, 2014)
Peso	60-150 kg/m ²	Arriba de 300 kg/m ² (puede requerir una estructura reforzada)	(Lanham, 2007) (MacIvor et al., 2013) (Dinsdale et al., 2006)

(Berardi et al., 2014)

Las azoteas verdes intensivas son caracterizadas por un espesor bastante alto de medio vegetal: las capas del suelo usualmente son más grandes que 200 mm, ver [Tabla 1.2](#), con una masa del suelo superior a 300 kg/m² ([Berardi et al., 2014](#)), también son llamadas jardines de techo o en inglés “*roof gardens*” y se caracterizan por una variedad de especies de plantas para incrementar su valor estético. Sin embargo son usualmente más caras debido principalmente al espesor de la capa del suelo y al frecuente requerimiento de mantenimiento sobre el deshierbado, fertilización y riego ([Carter & Keeler, 2008](#)).

Las azoteas verdes extensivas, por otra parte, son establecidas dentro de capas de suelo finas, cuentan con plantas más pequeñas que, en la etapa final de su implementación, se espera que provean una cubierta total a la azotea. Las azoteas verdes extensivas pretenden ser libres de mantenimiento, sin embargo algo de mantenimiento es a menudo recomendado ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)). Las azoteas verdes extensivas pueden ser establecidas en varias formas: a través de tapetes de vegetación prefabricados, sembrado de semillas, y vegetación espontánea auto establecida ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)).

Cabe destacar que pocas referencias identifican a una tercera clasificación de azoteas verdes: semi intensivas ([FLL, 2002](#)), los cuales están cubiertas por vegetación con césped y por plantas que cubren el suelo, estas azoteas requieren mantenimiento frecuente incluyendo el podamiento, el riego, y la fertilización ([Czemieli Berndtsson, 2010](#)).

Las azoteas verdes extensivas pesan menos y son apropiadas para las azoteas con amplias dimensiones mientras que el proceso de construcción de estas azoteas es técnicamente simple y permite una implementación sobre azoteas con pendiente. Los tipos de plantas que pueden ser utilizadas para las azoteas verdes son limitadas y tanto el desempeño energético, así como el potencial de administración de agua de lluvia son en cierta forma bajos ([Dunnett & Kingsbury, 2008](#)).

1.2.1. Selección del tipo de plantas

Debido a que las azoteas verdes extensivas incluyen plantas que cubren la superficie de la azotea y tienen un medio de peso ligero que crece, ellas son ideales para edificios amplios con azoteas planas y departamentos (Nagase & Koyama, 2020).

Al identificar y examinar los factores más importantes con relación a la selección de las plantas que pueden crecer en un clima dado con el propósito de ayudar a los diseñadores a hacer una decisión informada en este tema con base a la ubicación geográfica del edificio, para este propósito 3 factores son mencionados, ver [Tabla 1.3](#), concretamente el primer requerimiento es la luz solar, el segundo es la tolerancia al frío y el tercero es el requerimiento del agua. La luz directa solar es el parámetro o factor más importante a tomar en cuenta (Seyedabadi et al., 2021). Algunos tipos de plantas y sus características son mostradas en la [Figura 1.2](#).

Las plantas para azoteas verdes en áreas con luz solar intensa son adecuadas para climas cálidos, mientras que las plantas que prefieren la sombra no pueden resistir tal cantidad de luz solar y por lo tanto no son adecuadas para azoteas en estas áreas, como algunos ejemplos de tales plantas están las especies de hiedra (Bird et al., 2009), las cuales no pueden ser usadas como vegetación que cubra las azoteas a pesar de su alta capacidad de absorción de carbono.

[Tabla 1.3](#) Algunas plantas utilizables en azoteas verdes.

Planta Nombre científico	Planta Nombre común	Requerimiento solar	Tolerancia de temperatura	Requerimiento de agua
<i>Sedum acre</i> L.	Uña de gato Arroceta, Platanetas	Luz total	Tolerante al frío	Tolerante a la sequia
<i>Festuca ovina</i>	Cañuela, cañota Pan de cordero	Luz total	Tolerante al frío	Riego regular
<i>Cuphea hyssopifolia</i>	Trueno de venus Falsa brecina Cufoa	Alternar entre la sombra y luz	Ninguna tolerancia al frío	Riego regular
<i>Vinca major</i>	Hierba doncella	Luz total	Tolerante al frío	Poco riego

([Academic.com, 2022](#); [Agra et al., 2017](#); [Guiaverde.com, 2022](#); [JardineriaOn, 2022](#);

[Naturalezatropical.com, 2022](#))



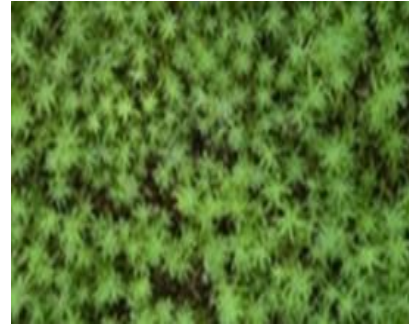
a)



b)



c)



d)

Figura 1.2 Algunas plantas utilizadas en las azoteas verdes *a)* *Cuphea hyssopifolia*, *b)* *Sedum acre* L., *c)* *Festuca ovina* (*Britannica, 2021*) y *d)* *Vinca major* (*Getter & Rowe, 2008*)

Después de seleccionar las plantas que no pueden crecer, ni prosperar debajo de la luz directa del Sol, se debe considerar la tolerancia al frío, esta característica es esencial para zonas con inviernos fríos o generalmente en climas secos y fríos, en tales climas la tolerancia determina si la azotea verde puede prosperar a lo largo del año por sí misma sin necesidad de cuidados especiales en temporadas frías, lo cual disminuirá los beneficios de conservación de energía (*Seyedabadi et al., 2021*).

El ahorro de energía está directamente relacionado con el tipo de plantas (*Kazemi & Mohorko, 2017*), temperaturas menores del sustrato son encontradas cuando una vegetación más espesa es usada y valores mayores son registrados en áreas con plantas de follaje escaso y hojas rojas (*Almeida et al., 2019*).

Considerando los problemas que continúan con relación a la escasez del agua, las azoteas verdes deben usar plantas que no necesitan riego. Con relación al riego y al mantenimiento de las azoteas verdes, se debe notar que las azoteas son más difíciles de regar y mantener

que los espacios verdes a nivel de suelo, esto es debido principalmente a la altura y posición de la azotea de los edificios, lo cual las hace desafiantes en términos de trabajo, instalación, y en equipo necesario para riego, drenaje y otras operaciones de mantenimiento (Seyedabadi et al., 2021).

Durante los últimos años las azoteas verdes han sido ampliamente estudiadas e implementadas debido a los múltiples beneficios que ofrecen (SmartCitiesWorld news team, 2021).

1.3. Beneficios

Una opción para mitigar el calentamiento global es la reducción del consumo de energía y de agua en las áreas urbanas principalmente mediante el aumento en la cantidad de vegetación en las ciudades, así como, el ahorro y reciclamiento del agua (IPCC, 2014).

El aumento de la vegetación en las grandes ciudades, donde cada vez se dispone de menos espacio, se puede lograr mediante la implementación de paredes y azoteas verdes. La implementación de las azoteas verdes pueden ser potencialmente motivada por múltiples factores incluyendo la eficiencia energética (Castleton et al., 2010), una mejora en la administración del agua de lluvia (Mentens et al., 2006), la mitigación de la isla de calor urbana (Zhang et al., 2020), aislación del sonido (Carter & Keeler, 2008; Van Renterghem, 2018), captura y secuestro de carbono (Shafique et al., 2020), proveer de un hábitat natural así como de un aumento y conservación de la biodiversidad (Brenneisen, 2003), una mejora en la capacidad del estado anímico de las personas que están alrededor de este tipo de azoteas (Hartig et al., 2014; K. J. H. Williams et al., 2019), una mejora en la estética visual (Mesimäki et al., 2019), un aumento en el valor de la propiedad y una mejora en el empleo (Celik & Ogus Binatli, 2018; Zhang & He, 2021).

Todos los beneficios anteriores dependen de las características de las azoteas verdes como: las especies de plantas que se desee instalar, características del sustrato y el mantenimiento que se le pretenda dar (Vijayaraghavan, 2016). Por lo que las azoteas verdes ofrecen una variedad de soluciones para mitigar el calentamiento global y otros problemas relacionados con la satisfacción humana.

1.3.1. Captura y secuestro de carbono

Algunos estudios recientes han abordado la captura de carbono en las azoteas verdes, los resultados muestran que la habilidad de secuestrar carbono depende del tipo de plantas, árboles y arbustos; también depende de las características del sustrato, el mantenimiento y el clima; por ejemplo, en el invierno la captura de carbono por parte de las plantas se ve directamente influenciada por la temperatura del ambiente, en donde debido a la baja temperatura del aire ambiente, la toma de carbono se ve limitada por las plantas y por ende las emisiones de CO₂ en el ambiente aumentan (Getter et al., 2009a).

La absorción de carbono de las azoteas verdes con diferente vegetación es determinada empíricamente al medir el peso seco de las plantas ya que el peso seco de las plantas determina la cantidad absorbida de carbono neta (Getter et al., 2009b; Whittinghill et al., 2014).

Se realizó un estudio sobre la captura del carbono en 12 azoteas verdes de 1 a 6 años de edad compuestos principalmente por especies *Sedum*, y profundidades de sustrato del rango de 2.5 cm a 12.7 cm en Michigan y Maryland, se encontró que los sistemas secuestraron un total de 375 g m⁻² dentro de la biomasa arriba y debajo del suelo en el periodo de abril de 2007 a octubre de 2008 (Getter et al., 2009a).

Para medir y comparar tasas de fotosíntesis de la plantas que a su vez permite determinar la captura de dióxido de carbono y la tasa de crecimiento, un analizador de gas infrarrojo es usado (Seyedabadi et al., 2021). En la literatura existen algunos cálculos para determinar los almacenamientos de contenido de carbono (SOC por sus siglas en inglés), densidad de la masa del suelo y espesor del suelo (Aguilar et al., 1988; J. Lee et al., 2009; Tiessen et al., 1982).

El sector inmobiliario ha sido por mucho tiempo un consumidor importante de energía y, por lo tanto, un tema de interés a los estudios y proyectos con objetivos a la conservación de energía. Junto con la calidad del aire urbano y la mitigación de la isla de calor, las azoteas verdes ofrecen opciones interesantes, además de absorber carbón a través de la fotosíntesis, las azoteas verdes con estas plantas también reducen las emisiones de carbón de los edificios, al reducir la demanda de energía (Seyedabadi et al., 2021).

1.3.2. Administración del Agua

Con respecto a la administración del agua, las azoteas verdes incrementan la retención de agua y, por lo tanto, ayudan a mitigar las inundaciones urbanas. Este tipo de estudios se suelen evaluar usando un modelo de administración de agua de lluvia, conocido como SWMM (por sus siglas en inglés), que a su vez se calibra usando el índice de eficiencia del modelo de Nash-Sutcliffe ([Paithankar & Taji, 2020](#)), el cual es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada contra la varianza de los datos medidos.

Las principales ventajas que se pueden obtener de la administración y de la recolección del agua de lluvia de las azoteas verdes es que estos sistemas interceptan entre 74% y 80% del deslave o caída de agua ([Living roofs, 2021](#)). La absorción del deslave hacia un sistema de azotea verde variará dependiendo del tipo de plantas, del tamaño de éstas, la velocidad del viento, la diferencia de temperatura, la evapotranspiración de las especies y la captura de agua de las plantas ([Living roofs, 2021](#)).

1.3.3. Costo

Con relación a la economía de estos sistemas de azotea verde, si son instaladas correctamente existe la posibilidad de extender la vida de una azotea convencional por un número de hasta 3 veces, los sistemas de azotea verde protegen la superficie de la azotea de los rayos ultravioleta provenientes del Sol, oscilaciones grandes en la temperatura del clima del lugar en donde se trate, además de proporcionar ahorro energético en cuanto al aire acondicionado ([Urban Scape, 2016](#)).

Para estimar el costo beneficio del ciclo de vida de una azotea verde dentro de un nivel de confianza adecuado y que a la vez sea una metodología adecuada, una metodología de Monte Carlo es requerida para estimar el costo beneficio ya que toma en consideración muchos factores que varían entre país como la inflación, la tasa de descuento, la empleabilidad, la eficiencia de la azotea verde, costos de los materiales, consumo y ahorro de energía, el tipo de azotea, las condiciones climáticas, la ubicación y la estructura ([Bianchini & Hewage, 2012](#)). Se encontró que el factor del ahorro de energía es la variable que más influencia el vapor presente neto, NPV (por sus siglas en inglés) en perspectivas sociales y privadas usando la técnica de la simulación de Monte Carlo con 10,000

simulaciones (Mahdiyar et al., 2021). Por otro lado, se encontró que las azoteas verdes son inversiones a corto plazo en términos de retornos netos, en general, la instalación de una azotea verde es una inversión de bajo riesgo, además la probabilidad de ganancias fuera de esta tecnología es mucho mayor que las pérdidas potenciales financieras, por lo que es evidente que la inclusión de los costos sociales y beneficios de las azoteas verdes mejoran su valor (Bianchini & Hewage, 2012).

1.3.4. Mitigación del efecto de la isla de calor urbano

Otro fenómeno que se mitiga al usar las azoteas verdes es el efecto de isla de calor urbano, ya que en las ciudades se tienen microclimas, el área de la ciudad está cubierta en su mayoría por una cubierta de concreto o por asfalto, las azoteas verdes tienen la ventaja de poder absorber este calor y por ende disminuir la temperatura ambiente creando un entorno más fresco ayudado principalmente por la evapotranspiración de las plantas, de ahí radica el beneficio en la disminución de la temperatura que también se relaciona con el efecto de isla de calor urbano (Agency United States environmental protection, 2019).

1.3.5. Biodiversidad y conservación de la naturaleza

(Brenneisen, 2003; Schrader & Böning, 2006) seleccionaron 10 azoteas verdes representativas de 2 clases de edad diferentes dentro de un área urbana de Hannover, Alemania. Se tomaron muestras no alteradas aleatoriamente procedentes de una profundidad superior a 4 cm. Un conjunto de muestras fue extraído para los micro artrópodos de acuerdo con el método del alto gradiente de (Macfadyen, 1961), para el análisis de la biodiversidad se utilizó el índice de diversidad de Shannon Weaver y la estructura dominante relativa de las especies Colémbolos fue determinada siguiendo el sistema de clasificación de (ENGELMANN & HD, 1978). El estudio muestra que la azotea verde extensiva da condiciones para desarrollos exitosos para la biota del suelo, en su caso de estudio fueron especies Colémbolos y procesos de formación del suelo, los cuales claramente contribuyen a la biodiversidad y compensan, al menos en parte las azoteas convencionales de concreto.

1.3.6 Aislación del sonido

Básicamente, el sonido se puede reducir por una azotea verde en dos formas, concretamente al proveer de una aislación incrementada y por la absorción de ondas del sonido que se difractan encima de las azoteas verdes.

Las propiedades de los materiales sobre los objetos sobre los cuales el sonido se difracta juegan un rol importante, Hadden y Pierce propusieron una solución analítica precisa para la difracción del sonido cerca de los bordes ([Van Renterghem & Botteldooren, 2011](#)).

Los sustratos comunes de una azotea verde tienen propiedades acústicas interesantes, los medios vegetativos usados en las azoteas verdes son altamente porosos, y permiten a las ondas acústicas entrar en el medio, lo cual es una propiedad necesaria de un material que es aislante acústico, debido al amplio número de interacciones entre las ondas y la fase sólida del sustrato en donde la atenuación ocurre.

Estas consideraciones teóricas son consistentes con los cálculos numéricos ([Van Renterghem & Botteldooren, 2008, 2009](#)) mostrando el alto potencial de las azoteas verdes en reducir las ondas sonoras que se difractan encima de estos, comparado con las azoteas rígidas.

Las mediciones muestran que las azoteas verdes pueden guiar a una reducción del sonido significativa y consistente en ubicaciones donde solo las ondas de sonido reflejadas llegan, entre los casos de solo una reflexión, las mejoras acústicas de las azoteas verdes excedían los 10 decibeles, sobre un amplio rango de frecuencia ([Van Renterghem, 2018](#)).

1.3.7 Estado anímico y estética visual

Algunas de las percepciones de los trabajadores que laboran en edificios con azoteas verdes en la ciudad de Toronto y Chicago fueron estudiadas mediante entrevistas semi estructuradas por ([Loder, 2014](#)). Se tiene que en general, la mayoría de los participantes asociaron las azoteas verdes con algún tipo de beneficio ambiental, principalmente debido a la asociación de plantas y vegetación con relación a la mitigación de la contaminación del aire. Los participantes indicaron que al ver una azotea verde a la distancia marcaba un gran impacto en su experiencia diaria que, si solo veían una superficie gris, también algunos participantes que no habían visto una azotea verde por primera vez experimentaron un sentimiento de fascinación y de sorpresa. A la par de que expresaron un sentimiento

relacionado con la cercanía de la naturaleza, los participantes a menudo consumieron de 8 a 10 horas al día en el trabajo, y expresaron la necesidad de tomar incluso un descanso mental de 5 minutos para ayudarlos a ser más productivos, a la par de que manifestaron expresiones de gratitud y esperanza sobre la colocación de las azoteas verdes dentro del acceso visual o físico de su espacio de trabajo (Loder, 2014).

1.3.8. Consumo de Energía

Una amplia variedad de técnicas de enfriamiento confía en los diseños de azoteas. Sin embargo, se puede observar que las construcciones más comunes en el sur de Europa son inadecuadas durante los días más cálidos del año (Palomo Del Barrio, 1998).

Las edificaciones son responsables por alrededor de la mitad del consumo de energía primario, de las emisiones de CO₂ en el Reino Unido y en otros países desarrollados (Ratcliffe, 2007). Una amplia proporción de esta energía es usada para mantener las temperaturas internas del edificio a través de los sistemas de calentamiento y enfriamiento (Castleton et al., 2010).

El tipo de plantas cultivadas sobre la superficie de la azotea verde, las características del suelo y el contenido de humedad, y el índice de área de hoja, LAI (por sus siglas en inglés) son algunos de los factores más importantes que influyen el desempeño térmico de una azotea verde (Seyedabadi et al., 2021).

Las azoteas verdes enfrían a través de la pérdida de calor latente, una reflectividad mejorada de la radiación solar y el incremento de la evapotranspiración (Taha, 1997). La relación de la radiación reflejada total a la radiación incidente es definida como albedo. (Berghage & Montalto, 2006) sugirieron que las azoteas verdes enfrían tan efectivamente como las azoteas blancas más brillosas, con un albedo equivalente de 0.70-0.85, comparado con 0.1-0.2 de la azotea común hecha de bitumen/grava/alquitrán. El consejo de investigación de Canadá emitió una publicación sobre los beneficios de las azoteas verdes donde en éste se menciona que las fluctuaciones de temperatura durante la primavera y el verano sobre una azotea convencional fueron del orden de 45°C, mientras que para una azotea verde se observan fluctuaciones del orden de 6°C (Living roofs, 2021). De acuerdo a la investigación alemana realizada en el noreste de ese país, las azoteas verdes reducen los costos de consumo eléctrico durante el invierno de 3% a 10% (Living roofs, 2021). La

investigación canadiense determinó que en el piso superior de un edificio con una azotea verde es probable ahorrar hasta 20% de la demanda de energía mediante la reducción de la necesidad por enfriamiento, en un edificio de 5 pisos o más, los ahorros de energía serían de 6% mientras que en un edificio de 2 pisos se tienen ahorros en verano de un 10% a 12% ([Living roofs, 2021](#)).

Las azoteas verdes y la ventilación nocturna son técnicas bien conocidas para ahorrar energía durante un periodo por enfriamiento. Combinando las azoteas verdes y la ventilación nocturna se puede reducir considerablemente la temperatura del aire del interior y las ganancias de calor sobre un día soleado ([Jiang & Tang, 2017](#)). El efecto de enfriamiento de una azotea verde depende de la densidad de los edificios que se relaciona con su altura y el área que ocupan.

Se encontró que las azoteas verdes redujeron la energía de enfriamiento de los edificios bajo un clima templado típico en Francia ([Jaffal et al., 2012](#)). Los resultados del estudio mostraron que, en verano la amplitud de la fluctuación de la temperatura de la base de la azotea fue reducida en 30°C debido a la azotea verde. Así mismo, el flujo de calor a través de la azotea también fue evaluado, en el verano el efecto de enfriamiento pasivo fue 3 veces más eficiente con la azotea verde, mientras que en el invierno la azotea verde redujo las pérdidas de calor durante los días fríos. Sin embargo, la azotea verde incrementó estas pérdidas durante los días soleados. Se demostró en este estudio que se tuvo un consumo de energía por enfriamiento de la azotea verde de 0.1 kWh m⁻² año⁻¹ y de 2.5 kWh m⁻² año⁻¹ para la azotea convencional, un consumo de energía por calentamiento de 36 kWh m⁻² año⁻¹ para la azotea convencional y 36.1 kWh m⁻² año⁻¹ para la azotea verde y un consumo total de energía para la azotea convencional de 38.5 kWh m⁻² año⁻¹ y de 36.2 kWh m⁻² año⁻¹ para la azotea verde ([Jaffal et al., 2012](#)).

([L. S. H. Lee & Jim, 2018](#)) notaron que una capa de sustrato de aproximadamente 10 cm es suficiente para reducir sustancialmente la penetración de calor dentro del edificio. La capa superior de la vegetación filtró alrededor del 90% de la irradiancia solar entrante, la temperatura de la superficie máxima del suelo y la temperatura de enfriamiento fueron de 19.8°C y 6.21°C, respectivamente, donde las temperaturas promedio más altas en Hong Kong en los meses de verano fueron de 27.9°C de junio, 28.8°C de julio y de agosto de 28.6°C ([L. S. H. Lee & Jim, 2018](#)).

En diversa literatura se ha encontrado que los efectos de las capas del suelo y vegetación varían en diferentes condiciones y dan lugar a un desempeño térmico diverso, por lo tanto, no es razonable evaluar o clasificar a una azotea verde como un material de aislamiento térmico tradicional (He et al., 2017). El sustrato del suelo actúa como una capa de aislamiento con una alta capacidad térmica y una baja transmitancia térmica, y las plantas proveen de un enfriamiento evaporativo (La Roche & Berardi, 2014), la superficie de la azotea verde húmeda reduce el calor transferido al interior del edificio (X. Tang & Qu, 2016). El índice de área de hoja, LAI, es de gran importancia sobre el desempeño térmico de las azoteas, sus valores son medidos de 2 formas, incluyendo el dispositivo métrico de área de hoja y la metodología de medida de peso (Seyedabadi et al., 2021).

1.4. Normas técnicas

Existen diversas normas técnicas acerca de la implementación de los sistemas de azotea verde que mencionan diversas acciones y recomendaciones acerca de la vegetación, la arquitectura, materiales de soporte, pendientes requeridas, riego, control de plagas, operación y mantenimiento. Algunas incluso como (Department for Communities and Local Government, 2013) menciona guías, recomendaciones y sugerencias para el control y previsión de peligros potenciales asociados a las azoteas verdes como el riesgo por incendio y por huracanes. Esta norma también se basa en (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V., 2002), (Green Roof Organisation (GRO), 2014) y (ANSI/SPRI VF-1, 2017). Por otro lado, cabe destacar que la búsqueda constante de reducir las emisiones de carbono, mejorar la eficiencia energética de un edificio, mejorar la calidad del ambiente interior, la eficiencia en el consumo de agua y lograr un desarrollo sustentable ha llevado a que se desarrolle un tipo de certificación internacional llamada LEED (Leadership in Energy & Environmental Design) en 1993 por el Consejo de Construcción Verde de Estados Unidos (USGBC por sus siglas en inglés).

Para el caso de México se aplica la norma técnica NADF013-RNAT-2017, la cual menciona especificaciones generales acerca de los materiales de soporte, pendientes requeridas, capas filtrantes, capas del sustrato, especificaciones de mantenimiento y operación, aspectos de seguridad estructural e información acerca de la arquitectura.

(Secretaría del medio ambiente, 2018), para la correcta aplicación de la norma se deberá considerar los siguientes documentos dentro del área metropolitana de la Ciudad de México como son: La Ley Ambiental de Protección a la Tierra en el Distrito Federal, Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento del Impacto Ambiental y Riesgo y Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (Secretaría del Medio Ambiente, 2018).

1.5. Antecedentes de las azoteas verdes

La historia temprana de las azoteas verdes data al siglo V cuando los jardines colgantes de babilonia fueron implementados (N. S. G. Williams et al., 2010), las azoteas verdes fueron también utilizadas dentro de los ziggurats de la antigua Mesopotamia (Heather Shimmin, 2012). La arquitectura Romana también abrazó las azoteas verdes, por ejemplo, Mysteries Villa representa tal integración y ofrece un ejemplo del espacio que aumenta las actividades humanas mientras mejora el valor estético y la vida de la azotea (Schmidt et al., 2002).

Las azoteas verdes también han sido implementadas en la arquitectura Vernácula en diferentes países, por ejemplo, en los países del noroeste de Europa (concretamente en Noruega) usaron azoteas verdes para incrementar el aislamiento térmico (Coutts et al., 2013). Después de muchos siglos de una escasa utilización durante la edad moderna, las azoteas verdes han sido redescubiertas en el siglo XX por el arquitecto suizo Le Corbusier quien los incluyó dentro de los 5 puntos de la arquitectura moderna (Eisenman, 2006). Alrededor de ese mismo tiempo, los arquitectos orgánicos americanos propusieron las azoteas verdes como un método para integrar la edificación y la naturaleza.

Una implementación más intensiva de las azoteas verdes empezó en los países de habla alemana en el año de 1970 (Eisenman, 2006). Las azoteas verdes también ganaron popularidad en Francia y Suiza dentro de los mismos años (Liu & Baskaran, 2003), luego algunas aplicaciones de las azoteas verdes en Norte América han emergido, particularmente dentro del área de Portland. Es en los últimos años que Japón ha enfatizado a las azoteas verdes como una tecnología ideal para disminuir el efecto de la isla urbana de calor y promover los edificios sustentables (Schmidt et al., 2002).

En el otro lado del océano atlántico, la primera azotea verde “americana” fue instalada en Nueva York, sobre la azotea del centro Rockefeller en 1930 (Ascione et al., 2013).

1.6. **Ámbito Mundial**

En la década de 1960, la degradación ambiental y la creciente densidad de las ciudades europeas reavivaron el interés por la técnica de las cubiertas verdes, que habían sido utilizadas por algunos arquitectos a principios del siglo XX. Alemania fue el líder a principios de la década de 1980 cuando el gobierno aprobó leyes que respaldaban las azoteas verdes y se pusieron a disposición los subsidios municipales (Boucher, 2006).

La utilización de la azotea verde está en aumento en Quebec, Canadá, varias ventajas ecológicas, económicas y sociales son atribuibles a éstas, notablemente en la administración de las aguas pluviales y la reducción del efecto de la isla de calor urbana. En Europa y en Estados Unidos, ya se han puesto en marcha incentivos para estimular su construcción (Boucher, 2006).

Actualmente, al menos 75 municipios europeos ofrecen incentivos en la instalación de azoteas verdes, especialmente por los beneficios relacionados con la reducción de la escorrentía de agua de lluvia y a la mejora de la calidad del aire y el agua (Boucher, 2006). La reciente atención hacia las azoteas verdes es demostrada por medio de conferencias dedicadas, asociaciones y competencia a nivel mundial, en la [Figura 1.3](#) se pueden ver algunas imágenes de azoteas verdes en hoteles de la ciudad de Chicago.



[Figura 1.3](#) Algunas azoteas verdes sobre hoteles de la ciudad de Chicago (Farina, 2006).

1.7. Ámbito Nacional

Para el contexto mexicano se tenían en el 2015 en la Ciudad de México 34,991 metros cuadrados de azoteas verdes, lo anterior equivale a 7 campos de fútbol. En total eran 28 azoteas verdes, 24 de ellas públicas instaladas en hospitales e instituciones educativas (Juan Paullier, 2015). Por ejemplo, en la [Figura 1.4](#) se muestra una azotea verde instalada en el edificio del INFONAVIT, dicha azotea es considerada la más grande e importante de Latinoamérica con un área de 5,266 metros cuadrados (López-González et al., 2020), el proyecto más reciente de azotea verde que se ha llevado a cabo es el de la Universidad Iberoamericana en 2019 con un área de 1,350 metros cuadrados (López-González et al., 2020).



[Figura 1.4](#) Sistema de azotea verde del INFONAVIT
Figura tomada de (ComScore, 2018).

1.8. Objetivo

Determinar el potencial de ahorro de energía eléctrica, por enfriamiento, debido a la implementación de una azotea verde extensiva en edificaciones ubicadas en diferentes zonas climáticas de México (Ciudad de México y Veracruz) por medio de simulación y mediante modelos experimentales se analiza el comportamiento térmico.

Objetivos particulares

- Analizar el impacto y el efecto térmico en una edificación utilizando dos modelos experimentales, uno con azotea verde y el otro con una azotea convencional.

- Determinar el potencial de ahorro de energía eléctrica debido a la utilización de un sistema de aire acondicionado con el software Revit en dos casos de estudio: Ciudad de México y Veracruz.
- Analizar la frecuencia de desencadenamiento de un accidente (incendio) en una azotea verde aplicando el software SAPHIRE.

Capítulo 2

Modelo matemático

Las azoteas verdes parecen ser una solución atractiva para las construcciones sostenibles porque producen diferentes beneficios para el edificio y su entorno. Sin embargo, los modelos dinámicos para la simulación de superficies vegetadas requieren el conocimiento de varios parámetros, frecuentemente difíciles de medir, para estimar con exactitud la transferencia de calor con el entorno exterior (Bevilacqua et al., 2020). A continuación, se describen los modelos matemáticos de transferencia de calor para los elementos envolventes del edificio, las capas que componen la azotea verde extensiva y el balance energético del interior del edificio.

2.1. Modelo de transferencia de calor para elementos envolventes

El modelo matemático de transferencia de calor para los elementos constructivos convencionales considera la conducción unidimensional del calor a través de la azotea y las paredes. Se considera que estos elementos están constituidos por un único material uniforme y opaco, es decir, no se consideran las ventanas. Los flujos de calor en una azotea convencional se muestran en la Figura 2.1.

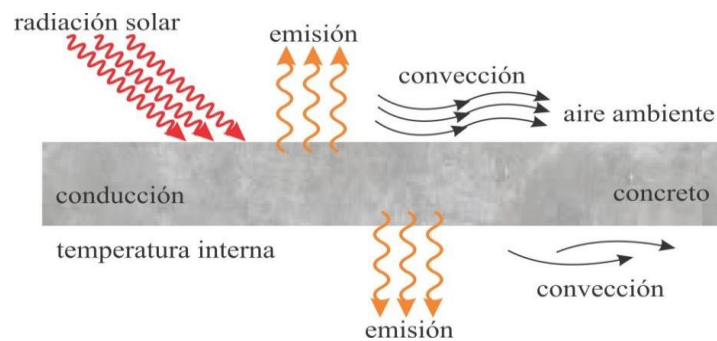


Figura 2.1 Flujos de calor en una azotea convencional.

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

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

donde ρ es la densidad, C_p es el calor específico, T_r es la temperatura de la envolvente, t es el tiempo, k es la conductividad térmica y z es la dirección en la cual se lleva a cabo la transferencia de calor.

La condición inicial está dada por:

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

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

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

donde q_{rs} es el calor ganado por radiación de onda corta, q_{em} es el calor neto transferido debido a la absorción y emisión de radiación de onda larga, q_{cv} es el flujo de calor debido a la convección. Estos flujos de calor se calculan a partir de:

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

$$q_{em} = \varepsilon \sigma (T_r^4 \Big|_{z=0} - T_e^4) \quad (5)$$

$$q_{cv} = h(T_r \Big|_{z=0} - T_\infty) \quad (6)$$

donde α es la absorptividad de la superficie, q_{sri} es la radiación de onda corta incidente en la superficie, ε es la emisividad, σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$), T_e es la temperatura de los alrededores, T_∞ es la temperatura ambiente y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor. El coeficiente convectivo de transferencia de calor se calcula a partir del número adimensional de Nusselt:

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

donde L_c es la longitud característica, para una superficie plana es la longitud de la superficie paralela al flujo del aire. El número de Nusselt para convección forzada en paredes planas se puede calcular a partir de la correlación (Churchill & Ozoe, 1973):

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

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

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

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

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

La convección natural es en donde cualquier fluido en movimiento ocurre por medios naturales, el movimiento del fluido en la convección forzada es bastante notable, ya que un ventilador o una bomba puede transferir suficiente momento al fluido para moverlo hacia una cierta dirección, el movimiento del fluido en la convección natural, sin embargo, es a menudo no notable debido a las bajas velocidades involucradas. El coeficiente de expansión volumétrico β de una sustancia representa la variación de la densidad de la sustancia con respecto a la temperatura a presión constante, para un gas ideal se expresa como (A. Cengel, 2002):

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (11)$$

donde T es la temperatura absoluta en K o en R. El régimen de flujo en la convección natural es gobernado por el número adimensional de Grashof, dado por

$$\text{Gr}_L = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^3} \quad (12)$$

donde g es la constante de aceleración de la gravedad y ν es la viscosidad cinemática. Las correlaciones para el número de Nusselt en la convección natural son expresadas en términos del número del número adimensional de Rayleigh definido como:

$$\text{Ra}_L = \text{Gr}_L \text{Pr} = \frac{g \beta (T_s - T_\infty) L_c^3}{\nu^3} \text{Pr} \quad (13)$$

La longitud característica para superficies horizontales está dada por:

$$L_c = \frac{A_s}{p} \quad (14)$$

donde p es el perímetro.

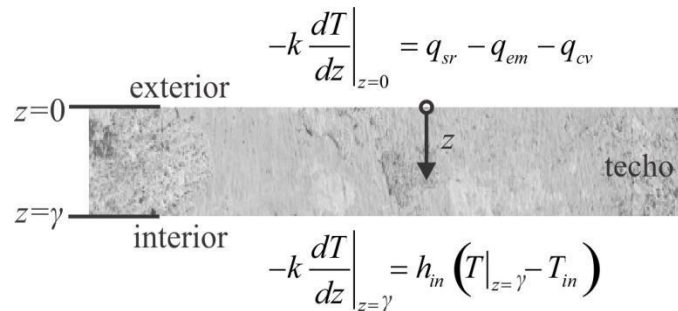
Dependiendo del valor de Ra se tendrán los siguientes casos:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.54Ra^{\frac{1}{4}} & \text{para } 10^4 \leq Ra < 10^7 \\ Nu &= 0.15Ra^{\frac{1}{3}} & \text{para } 10^7 \leq Ra \leq 10^{11} \end{aligned} \quad (15)$$

La condición de frontera para el interior del edificio es:

$$-k \frac{dT}{dz} \Big|_{z=\gamma} = h_{in} (T|_{z=\gamma} - T_{in}) \quad (16)$$

donde γ es el espesor de la envolvente, T_{in} es la temperatura del aire contenido en el interior del edificio e h_{in} es el coeficiente combinado de transferencia de calor en el interior del edificio, este coeficiente incluye la convección y la radiación. Las condiciones de frontera para el exterior y el interior del edificio se ejemplifican en la [Figura 2.2](#). Este modelo es utilizado para todas las envolventes del edificio, es decir azotea y paredes.



[Figura 2.2](#) Condiciones de frontera para el interior y el exterior del edificio.

2.2. Balance de energía para el interior del edificio

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

$$\frac{dT_{in}}{dt} = \frac{\dot{Q} + \dot{m}(\bar{h}_{\infty} - \bar{h}_{in})}{(mC_p)_{in}} \quad (17)$$

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

$$\dot{Q} = \sum h_{in} (T_i - T_{in}) A_i + \sum S_k - \dot{Q}_c \quad (18)$$

donde T_i y A_i son la temperatura y el área del elemento envolvente i , respectivamente. Por lo tanto, el primer término del lado derecho de la Ec. (18) representa la transferencia de calor a través de las envolventes. Mientras que S_k es el flujo de calor k dentro del edificio, debido a una fuente que puede ser debida a personas o aparatos eléctricos. \dot{Q}_c es el calor removido por el efecto de enfriamiento del sistema de aire acondicionado. La condición inicial de la Ec. (17) es:

$$T_{in} = T_{in,0} \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (19)$$

2.3. Modelo de transferencia de calor para la azotea verde

Un modelo conceptual de una azotea verde se muestra en la [Figura 2.3](#), en esta figura se muestran los flujos de calor en las diferentes capas que componen el sistema.

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

$$\left(\rho C_p\right)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = k_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2} \quad (20)$$

donde T_g es la temperatura de la capa verde, $(\rho C_p)_g$ y k_g son las propiedades efectivas de la capa verde que se pueden obtener a partir de (Quezada-García et al., 2017):

$$(\rho C_p)_{ef} = (\rho C_p)_1 (1 - \varsigma) + (\rho C_p)_2 \varsigma \quad (21)$$

$$k_{ef} = k_1 (1 - \varsigma) + k_2 \varsigma \quad (22)$$

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

$$\varsigma = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \quad (23)$$

donde V es el volumen ocupado por el componente.

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

$$(\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = k_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial z^2} \quad (24)$$

donde T_s es la temperatura del sustrato, $(\rho C_p)_s$ y k_s son las propiedades efectivas de la capa de sustrato y se pueden calcular de manera similar a las propiedades efectivas de la capa verde. Las Ecs. (23) y (24) toman en cuenta la porosidad de las capas. Se ha demostrado, a través de experimentos y simulación numérica, que la conductividad térmica depende de la porosidad y las propiedades térmicas de los componentes minerales del suelo (Besir & Cuce, 2018; Jean Côté et al., 2019).

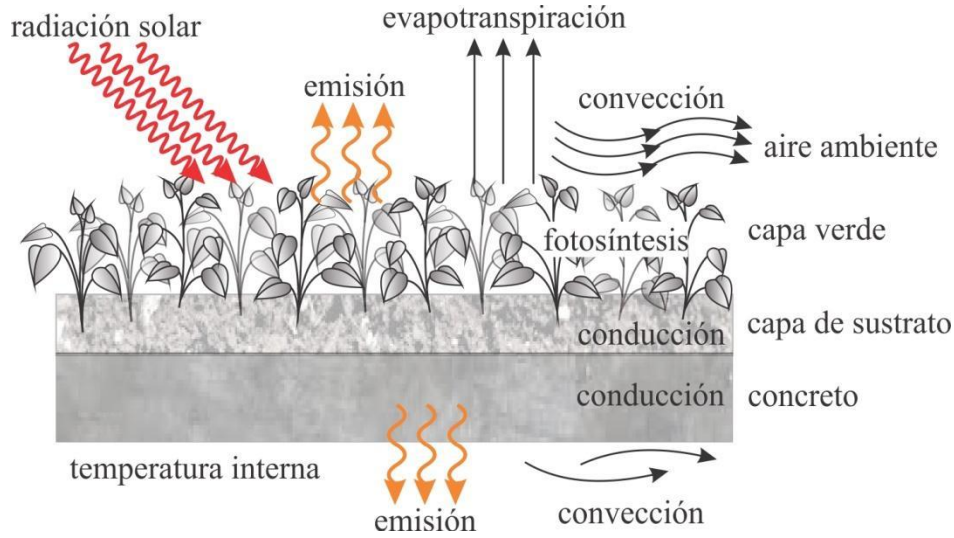


Figura 2.3 Modelo conceptual de una azotea verde con los principales flujos de calor.

Las condiciones iniciales para las Ecs. (20) y (24) son:

$$T_g(0, z) = T_{g,0}(z) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (25)$$

$$T_s(0, z) = T_{s,0}(z) \quad \text{en} \quad t = 0 \quad (26)$$

Las Ecs. (20) y (24) están relacionadas a través de la siguiente condición de frontera:

$$T_s(t) = T_g(t) \quad \text{en} \quad z = b \quad (27)$$

Donde b es el espesor de la capa verde. Las Ecs. (24) y (1) están relacionadas a través de la siguiente condición de frontera:

$$T(t) = T_s(t) \quad \text{en} \quad z = b + c \quad (28)$$

Donde c es el espesor de la capa de sustrato. La condición de frontera para la Ec. (20) en el exterior del edificio ($z = 0$) es:

$$-k_g \left. \frac{dT_g}{dz} \right|_{z=0} = q_{sr} - q_{em,g} - q_{cv,g} - q_{et} - q_{ps} \quad (29)$$

donde q_{et} es flux de calor debido a la evapotranspiración, $q_{em,g}$ es el calor neto transferido por emisión en la capa verde, $q_{cv,g}$ es el calor transferido por convección de la

capa verde al medio ambiente y q_{ps} es el flux de calor neto debido a la fotosíntesis y la respiración de las plantas, este último se puede calcular a partir de la siguiente correlación (Feng et al., 2010a)

$$q_{ps} = \frac{6.5}{TC(1 + R_{ep}/R_{tp})} q_{et} \quad (30)$$

donde TC es el coeficiente de transpiración, dichos valores se pueden obtener por experimentación (Feng et al., 2010b), 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 cuantificación de la evapotranspiración es bastante complicada, la literatura relacionada propone varios procedimientos, algunos modelos evalúan el estado de la vegetación como un material uniforme, compuesto por aire y foliage (Takakura et al., 2000). El flux de calor debido a la evapotranspiración se puede determinar a partir de (Feng et al., 2010a):

$$q_{et} = \lambda R_{et} \quad (31)$$

La evapotranspiración es una combinación del fenómeno de la transpiración de agua por las plantas durante su crecimiento o retenida en su tejido vegetal y el fenómeno de la evaporación de la humedad del sustrato (Cascone et al., 2019; Hargreaves & Allen, 2003). Estos fenómenos son función principalmente de la radiación solar que llega a la superficie del sustrato, ya que proporciona la energía necesaria.

La evapotranspiración se puede calcular empleando la ecuación de Hargreaves, que se basa en datos climáticos fácilmente disponibles (Hargreaves & Allen, 2003):

$$ET_0 = 0.0023q_{sri} (T_{\infty} - 255.35) T_R^{0.5} \quad (32)$$

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

$$T_R = T_{\max} - T_{\min} \quad (33)$$

Entonces R_{et} está dado por:

$$R_{et} = e_f ET_0 \quad (34)$$

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

El flux de calor por convección desde la capa verde hacia el ambiente se puede calcular a través de la correlación (Meng et al., 2006):

$$q_{cv,g} = (5.7 + 3.8v)(T_g - T_\infty) \quad (35)$$

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

$$q_{em,g} = \varepsilon\sigma(T_g^4 - T_{sky}^4) \quad (36)$$

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

$$T_{sky} = T_\infty - 13 \text{ K} \quad (37)$$

2.4. Sistema de aire acondicionado

Los sistemas de aire acondicionado controlan la temperatura y la humedad, así como la pureza del aire. El sistema más sencillo es el acondicionador de habitaciones: una unidad empaquetada que puede instalarse en una ventana o en una pared exterior y su capacidad puede ser de hasta 10kW (V Szokolay, 2008).

La comodidad del cuerpo humano depende de tres factores: la temperatura, la humedad relativa y el movimiento del aire. La temperatura del aire es el aspecto más importante en la comodidad. La mayor parte de la gente se siente cómoda con una temperatura ambiente entre 22°C y 27°C (Cengel & Boles, 2003). Para mantener una edificación a la temperatura deseada son necesarios algunos procesos definidos como acondicionamiento de aire. En la Figura 2.4 se ejemplifica un sistema de acondicionamiento de aire, conformado por evaporador, condensador, compresor y válvula de estrangulación. El sistema también cuenta con un termostato y un sistema de control para mantener la temperatura interior en el valor deseado.

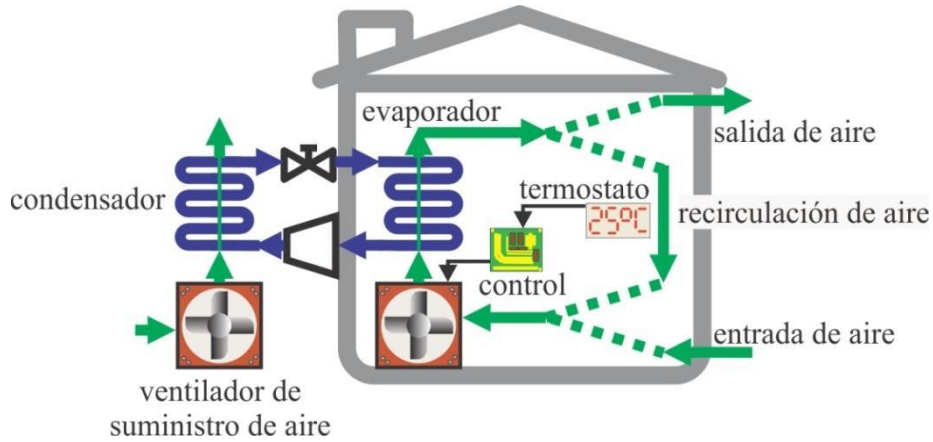


Figura 2.4 Sistema de acondicionamiento de aire.

Para determinar el consumo de energía eléctrica debido al uso de un sistema de aire acondicionado, se emplea el coeficiente de desempeño térmico (COP), el cual está dado por (Cengel & Boles, 2003):

$$COP = \frac{\dot{Q}_c}{\dot{W}} \quad (38)$$

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

$$E_{ac} = \dot{W} t_{ac} \quad (39)$$

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

$$\begin{aligned} T_{in} > 297.15 \text{ K} &\rightarrow \text{on (sistema encendido)} \\ T_{in} < 293.15 \text{ K} &\rightarrow \text{off (sistema apagado)} \end{aligned} \quad (40)$$

Si el motor es on/off entonces usa un inverter para ajustar el suministro de electricidad al motor de aire acondicionado modulando la frecuencia con el propósito de cumplir el requerimiento del proceso termodinámico, la instalación del sistema de aire acondicionado basado en el inverter ha sido bastante incrementado debido a su reducción de costo, su uso no solo ahorra consumo eléctrico sino que también da posibilidades a otros dispositivos de ser implementados como un controlador inteligente puede ser desarrollado

para ajustar y mantener el confort térmico dentro del interior como la principal prioridad (Viriyautsahakul et al., 2016).

2.5. Dimensionamiento

Para calcular con exactitud la potencia necesaria de aire acondicionado para remover el calor de un recinto o vivienda y mantener una temperatura de confort inferior a 25°C, se debe de tener en cuenta los siguientes factores:

- ❖ Conductividad térmica de las superficies
- ❖ Superficie de cada pared/azotea/suelo/ventana a climatizar
- ❖ Ventilación
- ❖ Coeficiente de intermitencia
- ❖ Ubicación
- ❖ Orientación geográfica
- ❖ Condiciones externas de humedad y temperatura
- ❖ Condiciones internas de humedad y temperatura requeridas

Se considera que existen cuatro tipos de climáticas básicos: clima frío para temperaturas menores a 18°C, clima templado de 19°C a 25°C, clima cálido de 26°C a 33°C y clima muy cálido para temperaturas superiores a los 34°C.

También es necesario tomar en cuenta la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior, ΔT . Se puede considerar una temperatura máxima en verano de 45°C para la zona sur y 35°C para la zona norte. En cuanto a la temperatura interior, por lo general se recomienda no superar los 25°C. Tomando en cuenta todos estos factores, la potencia necesaria de aire acondicionado por cada superficie está dada por:

$$\dot{W} = UA\Delta T \quad (41)$$

donde U es el coeficiente total de transferencia de calor, dado por:

$$U = \frac{1}{AR_t} \quad (42)$$

La potencia total necesaria para climatizar todo un espacio resulta de la suma de cada pared, azotea, suelo y ventana que tiene el espacio. Otro factor importante a tener en cuenta es la ventilación. Parte del aire refrigerado sale del recinto y es sustituido por aire exterior. Actualmente, se empieza a tener en cuenta la ventilación mecánica controlada y su recuperación energética. Las pérdidas por la renovación del aire se pueden calcular a partir de:

$$\dot{W}_{\text{ventilación}} = \rho_a C_{p_a} f V \Delta T \quad (43)$$

donde f es la fracción de aire que sale del espacio a refrigerar y es sustituido por aire exterior, se expresa en s^{-1} , este factor depende del tiempo que permanezca abierta la puerta o las ventanas. Para una actividad moderada se puede tomar como $4 \times 10^{-4} s^{-1}$.

El coeficiente o suplemento de intermitencia es un valor que se utiliza para aportar cierto margen de seguridad al resultado del cálculo. Generalmente se le asigna un valor entre 1 y 2. Entre menos horas al día se utilice la instalación, mayor será el valor de C que se debe emplear. Así la potencia total está dada por:

$$\dot{W}_{\text{total}} = C \left(\sum_i^n \dot{W}_i + \dot{W}_{\text{ventilación}} \right) \quad (44)$$

En algunos casos es importante tomar en cuenta la carga térmica interna en el dimensionamiento del aire acondicionado. La carga térmica interna está formada por el calor que aportan las personas en el lugar, así como por los aparatos que consumen energía para su funcionamiento como: computadoras, lámparas y televisores, por mencionar algunos.

En la [Tabla 2.1](#) se muestra la cantidad extra de potencia que se debe de considerar para las cargas térmicas internas.

Tabla 2.1 Emisión de calor de electrodomésticos

Equipo	Total (W)
Impresora	30-300
Refrigerador (1 puerta, manual)	150-260
Aspiradora	600-1200
Tostador (2 rebanadas)	1000-2200
Waflera	200-400
Calentador de agua (domestico)	2400-3600

(V Szokolay, 2008).

2.6 Comportamiento térmico en los edificios

Un edificio puede ser considerado como un sistema térmico, con un conjunto de entradas y salidas de calor, este sistema puede ser analizado asumiendo condiciones de estado fijo (las condiciones del interior y del exterior son fijas) o considerar un estado dinámico. La más significativa entrada de calor a un edificio son las ganancias solares (V Szokolay, 2008). Lo primero es controlar la entrada de ganancias solares para determinar cuando la radiación solar será una entrada necesaria al sistema o cuando debe de ser excluida (sobrecalentamiento). Con base a (De Dear et al., 1997) se define la temperatura de neutralidad T_n (la mediana de muchos votos de la gente), la cual cambia en relación a la temperatura promedio del mes $T_{o,av}$. Ec. (45), donde $T_{o,av}$ es la temperatura promedio del mes (V Szokolay, 2008).

$$T_n = 17.8 + 0.31T_{o,av} \quad (45)$$

El rango de las condiciones de confort aceptables es generalmente referido como la zona de confort, los límites de tal zona de confort pueden ser tomados con relación a la temperatura de neutralidad T_n para una aceptabilidad del 90% como $(T_n - 2.5)^\circ\text{C}$ a $(T_n + 2.5)^\circ\text{C}$ (V Szokolay, 2008). Se hicieron varias correlaciones y (I.Griffiths, 1990) encontró

$$T_n = 12.1 + 0.534T_{o,av} \quad (46)$$

ASHRAE especifica los límites de la zona de confort donde el 90% de los ocupantes o personas ligeramente activas encuentran el ambiente térmicamente aceptable, si el ambiente es térmicamente uniforme. El objetivo de la norma ISO 7730 es definir la evaluación del confort en entornos moderados (Olesen, 1995). ISO 7730 sugiere que la PMV (voto medio estimado) debe mantenerse entre rangos de $\pm 0,5$ para un buen nivel de comodidad (Olesen, 1995). La ecuación de PMV proporciona una puntuación que corresponde a la escala de sensación térmica (Taweekun & Tantiwichien, 2013). Según (ASHRAE, 2021), la clasificación de sensaciones térmicas se puede ver de la siguiente manera en [Tabla 2.2](#):

[Tabla 2.2](#) Escala de sensaciones térmicas

Escala de sensación térmica		
	Scala	Comentarios
3	Caliente	Intolerablemente cálido
2	Cálido	Demasiado cálido
1	Ligeramente cálido	Tolerablemente inconfortable, cálido
0	Neutro	Confortable
-1	Ligeramente fresco	Tolerablemente inconfortable, fresco
-2	Fresco	Demasiado fresco
-3	Frío	Intolerablemente fresco

La escala de sensación térmica de acuerdo a (SIMSCALE, 2021), así como la relación aproximada entre PPD y PMV se muestra en la [Figura 2.5](#).

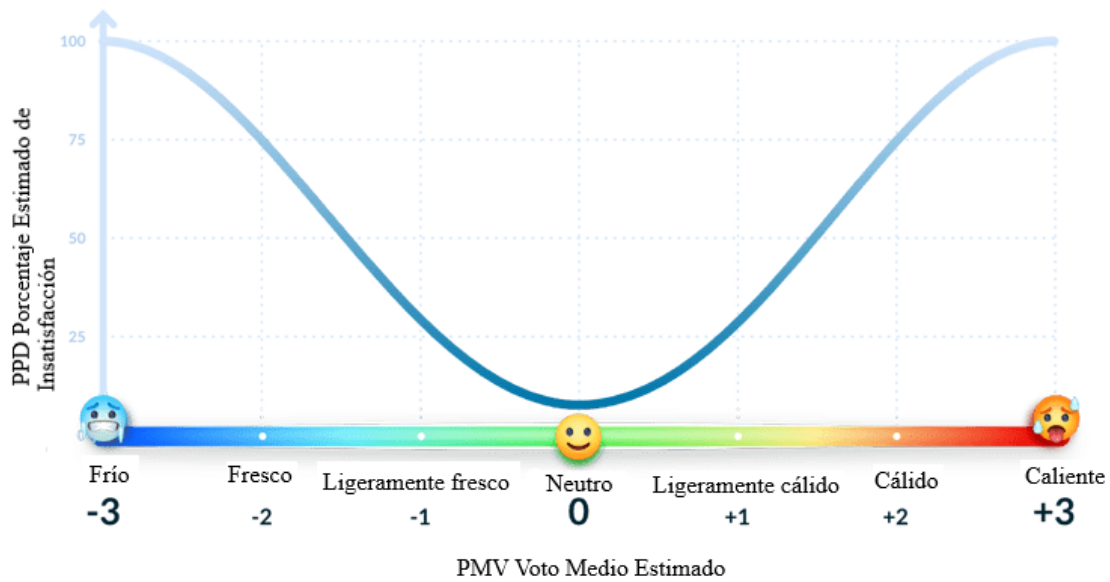


Figura 2.5 La relación entre PPD y PMV (SIMSCALE, 2021)

El 5% de los ocupantes estaría insatisfecho incluso en las condiciones más cómodas, en el nivel $PMV = 0$ (Olesen, 1995), lo que se puede obtener sustituyendo ese valor en la ecuación Ec. (51).

Fanger describió los criterios de comodidad que fueron definidos por estudios teóricos, experimentales y estadísticos (Taweekun & Tantiwichien, 2013). La ecuación PMV es la combinación cuantitativa de actividad, ropa, temperatura del aire, temperatura radiante media, velocidad del aire y humedad relativa del aire. PMV se muestra en la Ec. (47) (Can Ekici, 2013).

$$PMV = \left(0.352e^{-0.042 \frac{M}{A_{DU}}} + 0.032 \right) \left[\begin{aligned} & \frac{M}{A_{DU}}(1-\eta) - 0.35 \left[43 - 0.061 \frac{M}{A_{DU}}(1-\eta) - p_a \right] - \\ & 0.42 \left[\frac{M}{A_{DU}}(1-\eta) - 50 \right] - 0.023 \frac{M}{A_{DU}}(44 - p_a) - \\ & 0.0014 \frac{M}{A_{DU}}(34 - T_a) - \\ & 3.4 \times 10^{-8} f_{cl} \left[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4 \right] \\ & - f_{cl} h (T_{cl} - T_a) \end{aligned} \right] \quad (47)$$

donde PMV es el voto medio estimado, A_{DU} es la superficie del cuerpo humano en m^2 , M es la tasa de producción metabólica en $W m^{-2}$, η la eficiencia mecánica, P_a es la presión de vapor del agua en unidades de mmHg, T_a es la temperatura del aire en $^{\circ}C$, f_{cl} es el factor de arropamiento (el ratio de la superficie de área de un cuerpo arropado a el área de superficie de un cuerpo desnudo), T_{cl} es la temperatura de superficie de arropamiento en unidades de $^{\circ}C$, T_{mrt} es la temperatura radiante media en $^{\circ}C$, h es el coeficiente de transferencia de calor convectivo en unidades de $kcal m^{-2} h^{-1} ^{\circ}C^{-1}$.

$$T_{cl} = 35.7 - 0.032 \frac{M}{A_{DU}}(1-\eta) - 0.18 I_{cl} \left[3.4 \times 10^{-8} f_{cl} \left[(T_{cl} + 273)^4 - (T_{mrt} + 273)^4 \right] + f_{cl} h (T_{cl} - T_a) \right] \quad (48)$$

donde I_{cl} es la resistencia térmica de arropamiento, en $m^2 K W^{-1}$ (Can Ekici, 2013).

$$h = \begin{cases} 2.05(T_{cl} - T_a)^{0.25} > 10.4\sqrt{v} \rightarrow h = 2.05(T_{cl} - T_a)^{0.25} \\ 2.05(T_{cl} - T_a)^{0.25} < 10.4\sqrt{v} \rightarrow h = 10.4\sqrt{v} \end{cases} \quad (49)$$

donde v es la velocidad relativa del aire en $m s^{-1}$ (Can Ekici, 2013).

$$f_{cl} = \begin{cases} I_{cl} < 0.5clo \rightarrow 1.0 + 0.2I_{cl} \\ I_{cl} > 0.5clo \rightarrow 1.05 + 0.1I_{cl} \end{cases} \quad (50)$$

(ASHRAE, 2021) propone ciertos valores de clo dependiendo de la combinación de ropa.

La ecuación de PMV proporciona una puntuación que se explica a través de la escala de sensación térmica (Can Ekici, 2013).

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.3353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (51)$$

2.7. Índices para la evaluación del rendimiento térmico

2.7.1. Resistencia térmica equivalente

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

$$R_{TE} = \frac{T_{s,ex} - T_{s,in}}{q_{md}} \quad (52)$$

donde q_{md} es el flux medio de calor 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. En la [Figura 2.6](#) se muestra donde es tomada la temperatura media de las superficies interior y exterior.

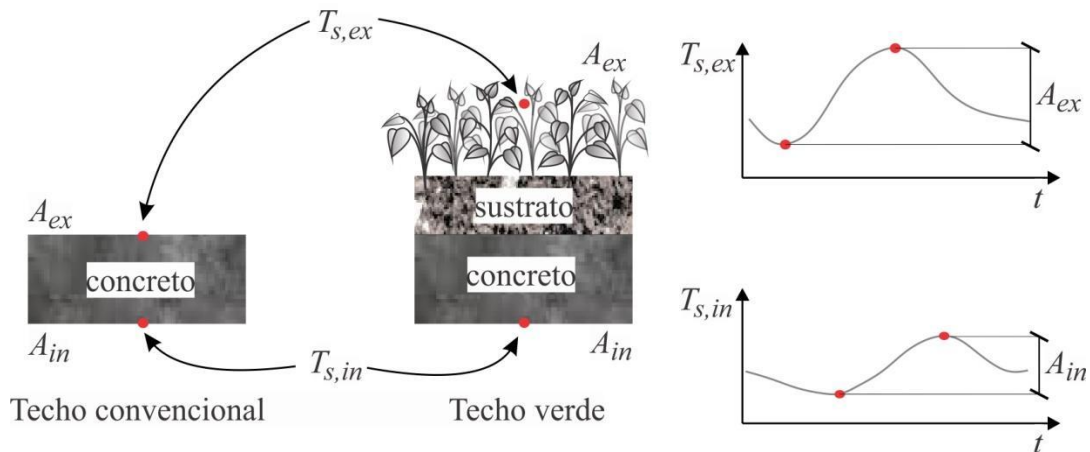


Figura 2.6 Puntos donde se toman la temperatura media de las superficies interior y exterior.

2.7.2. Factor de disminución equivalente

El factor de disminución equivalente se utiliza para caracterizar la capacidad de la envolvente del edificio para resistir las fluctuaciones periódicas de la temperatura del aire, también se le conoce como capacidad de inercia térmica. Se define como la relación de las amplitudes diarias máximas de las fluctuaciones de temperatura interna y externa ([M. Tang & Zheng, 2019](#)).

$$f = \frac{A_{in}}{A_{ex}} \quad (53)$$

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

2.7.3. Factor de climatización

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

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n |T_{in,i} - T_{confort}|}{nT_{confort}} \quad (54)$$

donde n es el número de mediciones diarias que se tienen de la temperatura interior.

2.8. Solución numérica

Las ecuaciones diferenciales son resueltas numéricamente por el método de diferencias finitas. Las Ecs. (1), (20) y (24) son de la forma:

$$(\rho C_p)_{ef} \frac{\partial T}{\partial t} = k_{ef} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (55)$$

Aplicando el método de diferencias finitas se tiene:

$$T_j^{t+\Delta t} = T_j^t + \frac{\Delta t}{(\Delta z)^2} \frac{k_{ef}}{(\rho C_p)_{ef}} (T_{j+1}^t - 2T_j^t + T_{j-1}^t) \quad (56)$$

Las condiciones de frontera (Ecs. (3), (16), (29)) son de la forma:

$$-k \frac{dT}{dz} = \sum q_m \quad (57)$$

donde q_m es la m -ésimo flux de calor. La Ec. (53) se puede reescribir como:

$$T_{j+1} = T_j - \frac{\Delta z}{k} \sum q_m \quad (58)$$

mientras que la Ec. (17) tiene la siguiente forma:

$$T_{in}^{t+\Delta t} = T_{in}^t + \Delta t \left[\frac{Q}{(mC_p)_{in}} + \dot{m}(h_{\infty} - h_{in}) \right] \quad (59)$$

La solución numérica, de los modelos matemáticos de transferencia de calor para los edificios con azotea convencional y con azotea verde, es implementada en Python 3.6.3. El tamaño de paso temporal es de $\Delta t = 1.0s$. Mientras que el tamaño del paso espacial para los elementos constructivos, incluyendo todas las paredes y la azotea convencional es $\Delta z = 0.01m$; el tamaño de paso espacial para la azotea verde es de $\Delta z = 0.03m$. Los nodos de la malla espacial utilizados para la estimación del perfil de temperaturas en la azotea se muestran en la [Figura 2.7](#).

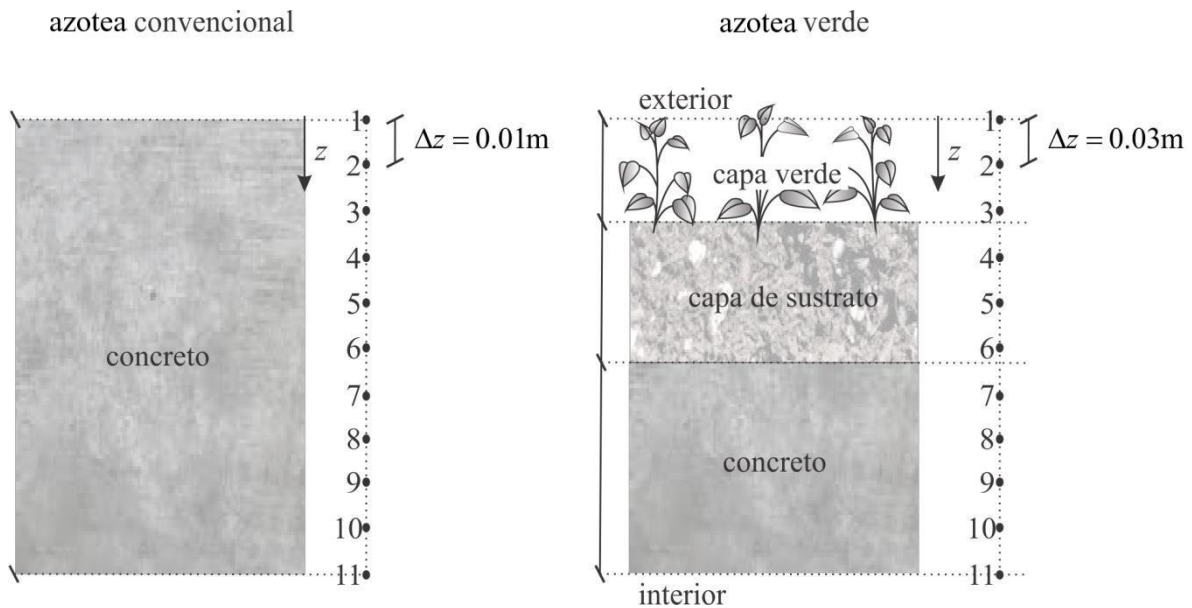


Figura 2.7 Nodalización para la azotea convencional y de la azotea verde.

Capítulo 3

Modelo Experimental

3.1 Descripción

En este capítulo se describen los modelos experimentales utilizados para representar dos tipos de edificaciones, una de ellas con azotea convencional y la otra con azotea verde. El objetivo de estos modelos experimentales es analizar el impacto térmico que tiene la instalación de una azotea verde en una edificación.

Los modelos experimentales se encuentran ubicados en la Ciudad de México, en la alcaldía Iztapalapa, como se muestra en la [Figura 3.1](#).

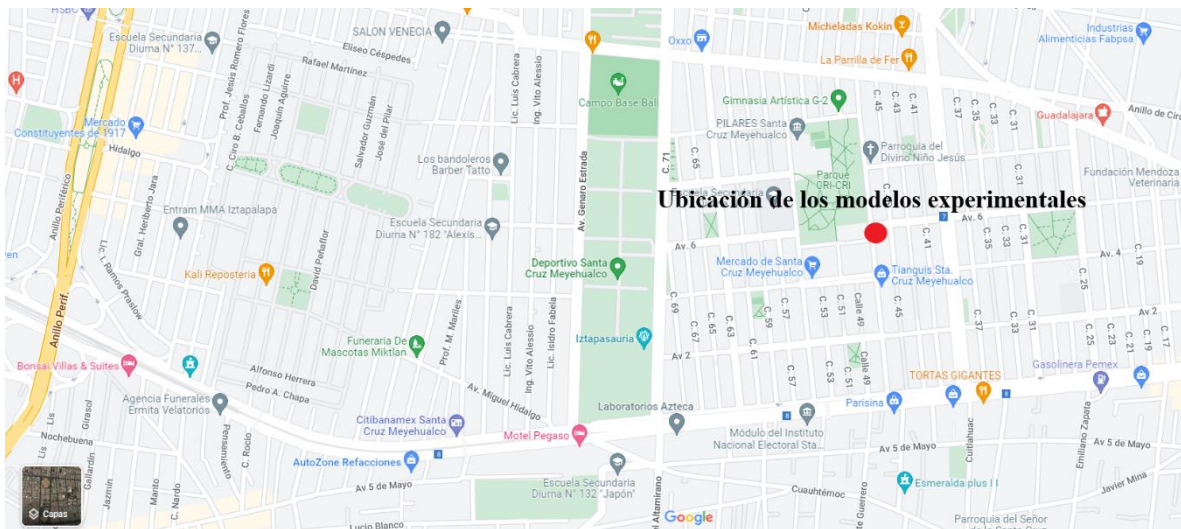


Figura 3.1 Ubicación de los modelos experimentales en la alcaldía Iztapalapa ($9^{\circ}20'45.42''N$, $99^{\circ}02'32.97''W$) (Google Earth, 2022).

Los modelos experimentales son dos paralelepípedos con base cuadrada que no tienen ventanas, por la parte interna, que es hueca, se coloca un sensor de temperatura suspendido con un hilo con el fin de monitorear la temperatura del aire interior, en la superficie exterior se coloca un segundo sensor para monitorear la temperatura a diferentes intervalos de tiempo.

Los dos modelos experimentales miden 40 cm × 40 cm de superficie y 30 cm de altura y están contruidos con concreto ligero, véase [Figura 3.2](#). Uno de los modelos experimentales tiene una capa de vegetación en su superficie para representar la azotea verde. La superficie vegetada está formada por plantas tipo *Sedum lineare* y una capa de tierra. Las [Figuras 3.3](#) y [3.4](#) ilustran los modelos experimentales y sus dimensiones. La [Tabla 3.1](#) muestra el espesor de concreto, la profundidad del sustrato y la altura de las plantas. Mientras que en la [Tabla 3.2](#) se enlistan las propiedades térmicas de los materiales utilizados.



[Figura 3.2](#) Modelos experimentales de concreto.

[Tabla 3.1](#) Espesores de los materiales del modelo experimental con azotea verde.

Altura de la vegetación (planta)	0.05 m
Profundidad del sustrato	0.07 m
Espesor del concreto	0.10 m

Tabla 3.2 Propiedades térmicas de los materiales utilizados en los modelos experimentales.

Material	C_p (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Planta	4800 (Feng et al., 2010b)	66 (Feng et al., 2010b)	0.268-0.548 (Hays, 1975)
Suelo	840 (hk-phy.org, 2022)	1602 (CivilScoops, 2022)	0.15-0.25 (The Engineering ToolBox, 2021a)
Concreto	657 (Material Property Data, 2022)	2000 (Alengaram, 2022)	0.1-0.3 (The Engineering ToolBox, 2021b)

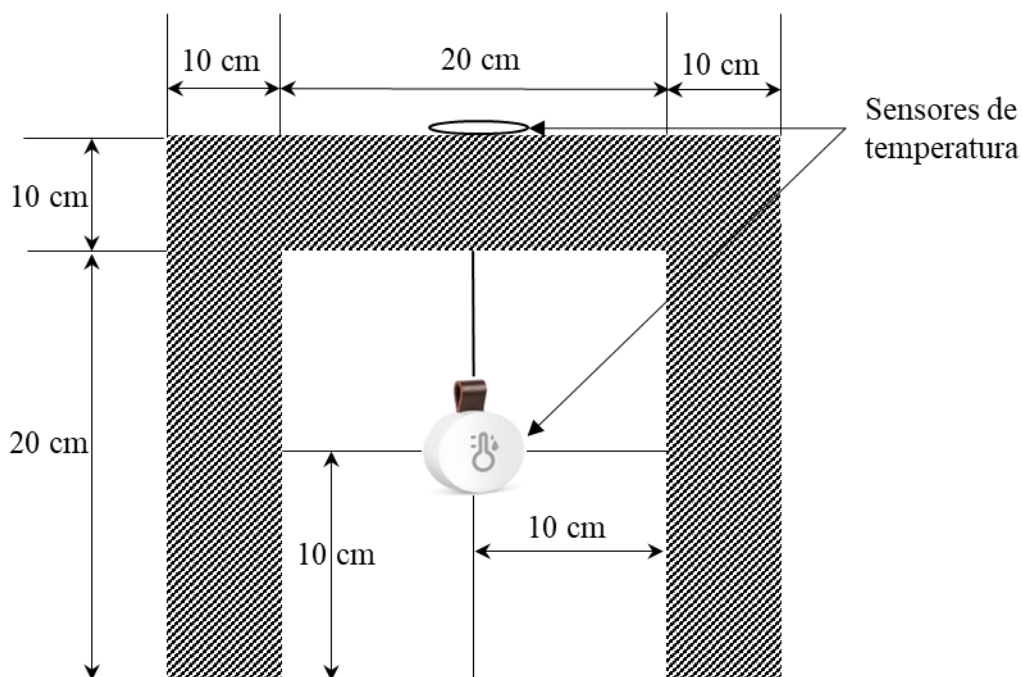


Figura 3.3 Esquema del modelo experimental de la azotea convencional.

Para monitorear la temperatura en el interior de los modelos experimentales y en su superficie exterior se utilizan los sensores de temperatura de la marca *SensorBlue* que funcionan en un rango de temperatura de -20°C a 65°C, tienen una precisión de 0.5°C y registran la temperatura cada 10 minutos por medio de una conexión bluetooth con un teléfono inteligente.

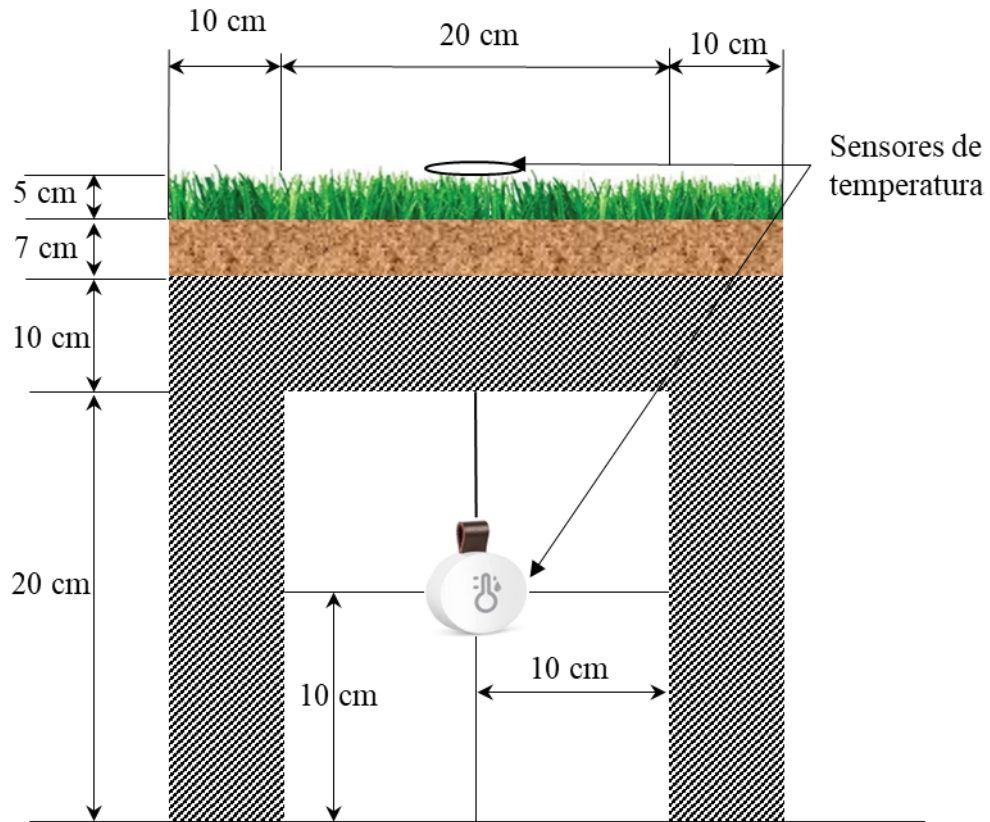


Figura 3.4 Esquema del modelo experimental de la azotea verde.

En la Figura 3.5 se muestra una imagen de los modelos experimentales terminados y listos para ser utilizados.

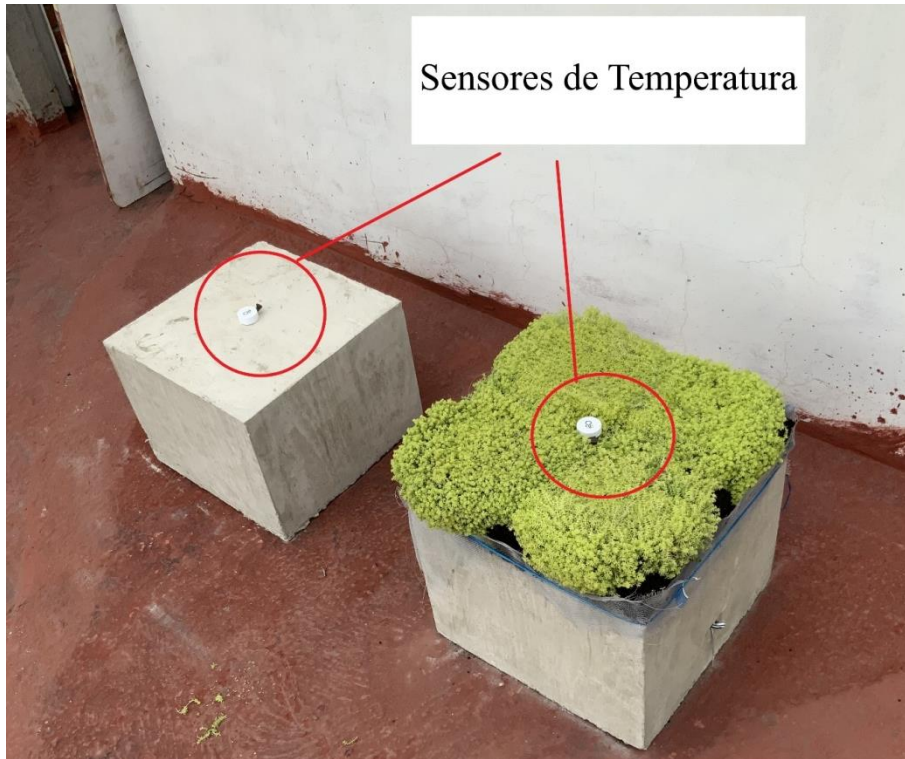


Figura 3.5 Modelos experimentales con la azotea verde y convencional.

3.2 Descripción de los experimentos

Una vez que se han montado e instrumentado los modelos experimentales son colocados en un lugar donde reciben directamente la radiación solar. En la [Figura 3.6](#) se muestra la ubicación de los modelos experimentales y el recorrido del sol.

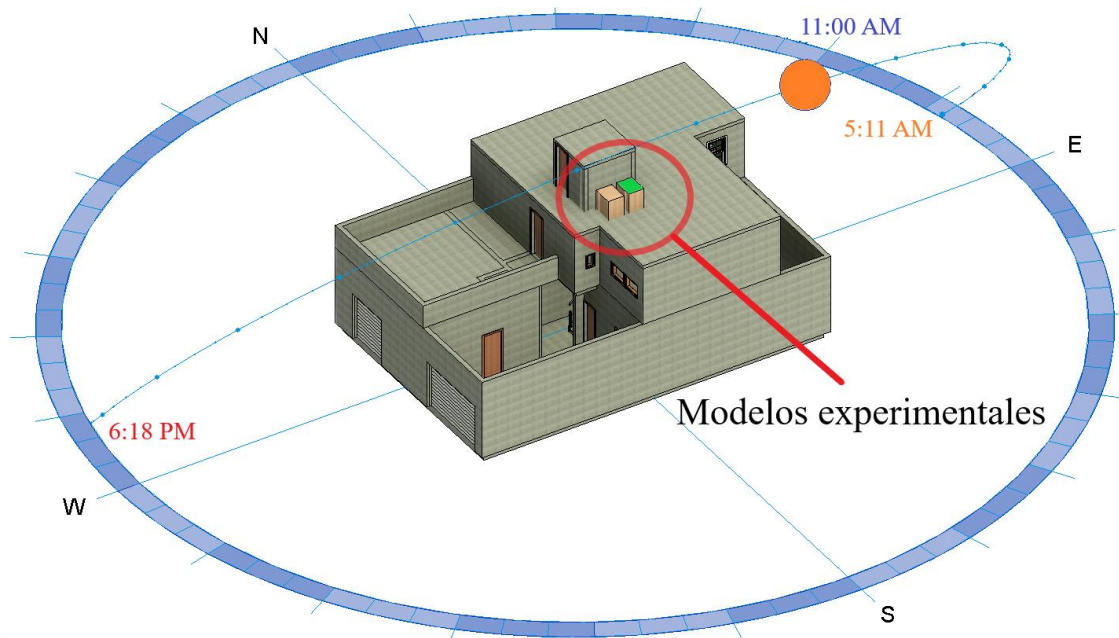


Figura 3.6 Recorrido del sol a lo largo de la vivienda (REVIT, 2022b)

De acuerdo con la posición de los modelos experimentales y como se muestra en la [Figura 3.7](#), las paredes sur, este y oeste son las únicas que reciben radiación solar.

Los sensores de temperatura son vinculados con el teléfono inteligente por medio de la aplicación *SensorBlue* para que registren la temperatura cada 10 minutos. Se realizan pruebas de conectividad para verificar la recepción y el registro adecuado de los datos en el teléfono inteligente. Es importante verificar que se mantenga el registro de los datos durante el experimento, ya que una desconexión puede ocasionar la pérdida de información.

El experimento consiste en medir las variaciones de temperatura interna y externa cada 10 minutos durante siete días en dos épocas diferentes del año, con el fin de tener diferentes condiciones ambientales.

El primer periodo de pruebas se llevó a cabo del 23 al 30 de noviembre del 2021, el segundo periodo de pruebas se llevó a cabo del 12 al 19 de marzo del 2022 y el tercer periodo de pruebas es del 21 al 28 de marzo del 2022, este último periodo se diferencia de los periodos anteriores porque en este caso se utiliza hielo como medio de enfriamiento para simular un sistema de aire acondicionado, para tal efecto, se colocaron 500 g de hielo en la parte inferior de los modelos experimentales, esta adición de hielo se realizó cada día en horario matutino durante los 7 días. En la [Figura 3.8](#) se muestra el sitio donde se coloca el hielo.

Los datos experimentales adquiridos durante el periodo de pruebas son registrados, almacenados y posteriormente se analizan.

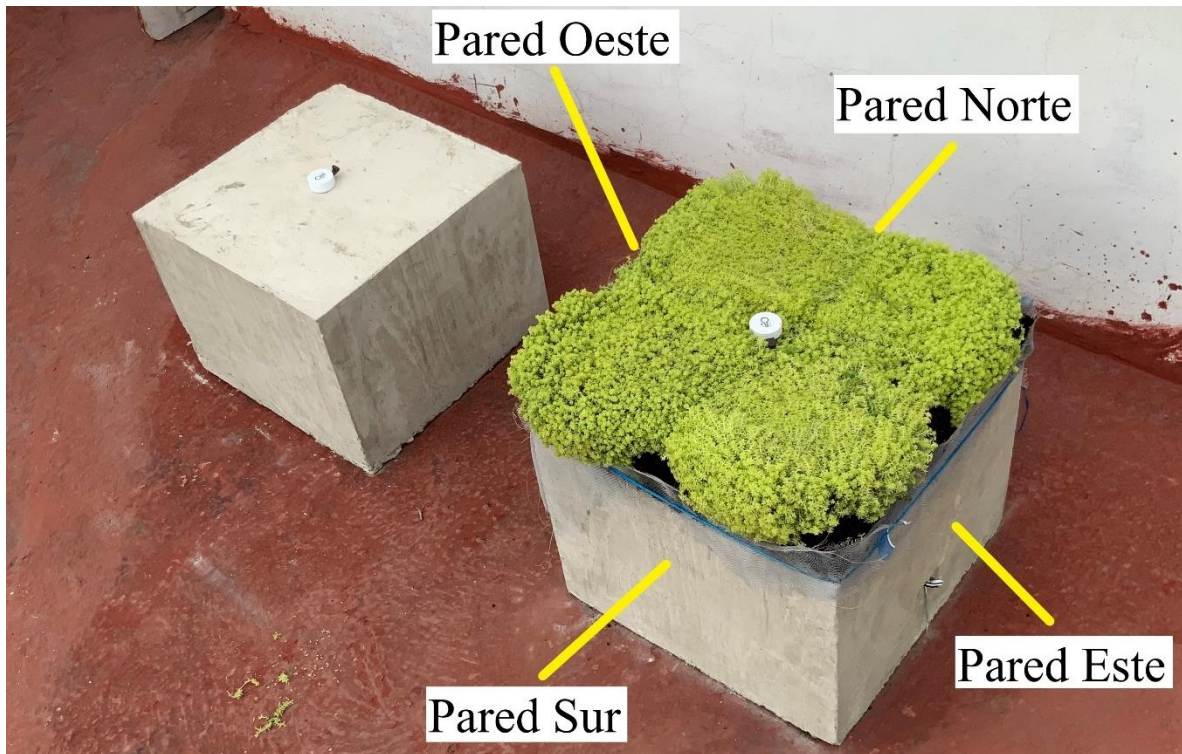


Figura 3.7 Identificación de las paredes de los modelos experimentales.

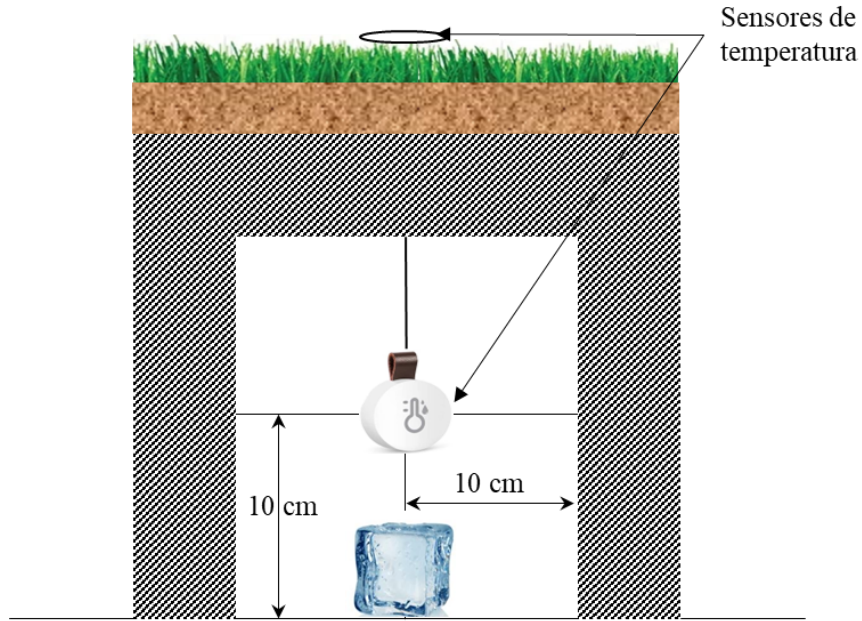


Figura 3.8 Esquema del modelo experimental de la azotea verde.

3.3 Datos meteorológicos

Las condiciones climáticas para los tres periodos de estudio para la Ciudad de México se muestran en las Figuras 3.9-3.17, los cuales fueron obtenidas de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS, 2021), los datos se reportan cada 10 minutos en la página, sin embargo se hace un promedio por hora y los resultados se muestran a partir de las 00:00 horas hasta las 23:00 horas.

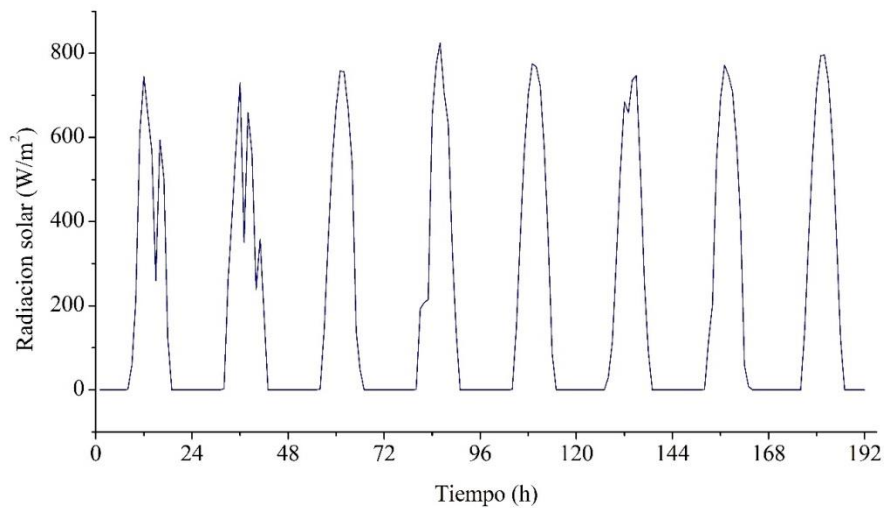


Figura 3.9 Radiación solar en el periodo del 23 al 30 de noviembre de 2021.

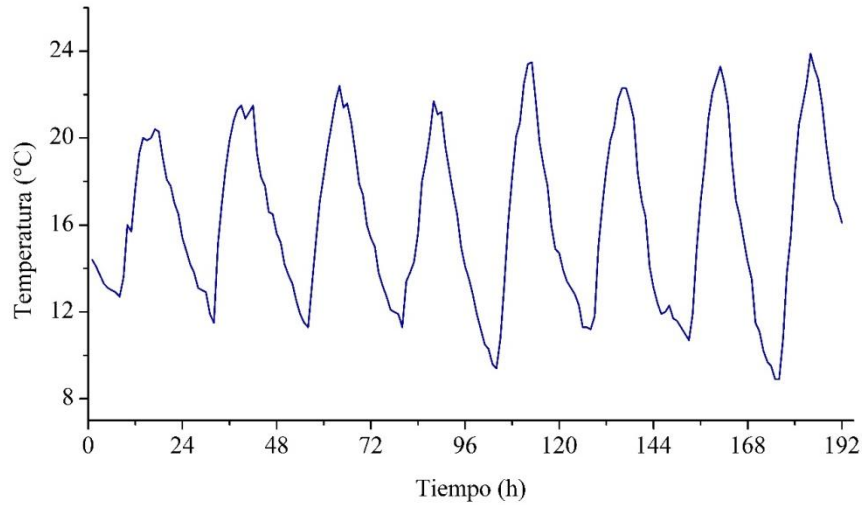


Figura 3.10 Temperatura ambiente en el periodo del 23 al 30 de noviembre de 2021.

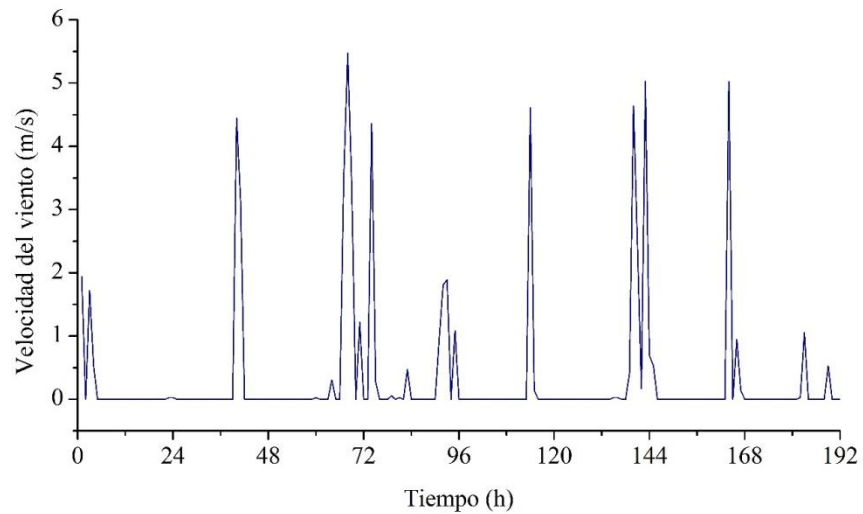


Figura 3.11 Velocidad del viento en el periodo 23 al 30 de noviembre de 2021.

Las condiciones climáticas para el periodo del 23 al 30 de noviembre de 2021 se muestran en las [Figura 3.9 – 3.11](#). Las condiciones climáticas para el segundo periodo que va del 12 al 19 de marzo se muestran en las [Figura 3.12 – 3.14](#). Mientras que las condiciones climáticas para el tercer periodo que va del 21 al 28 de marzo se muestran en las [Figura 3.15 – 3.17](#).

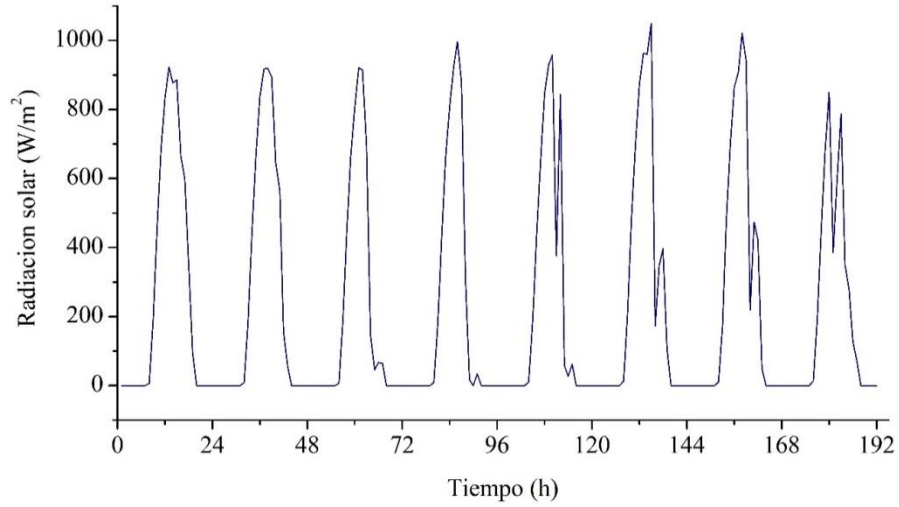


Figura 3.12 Radiación solar en el periodo del 12 al 19 de marzo de 2022.

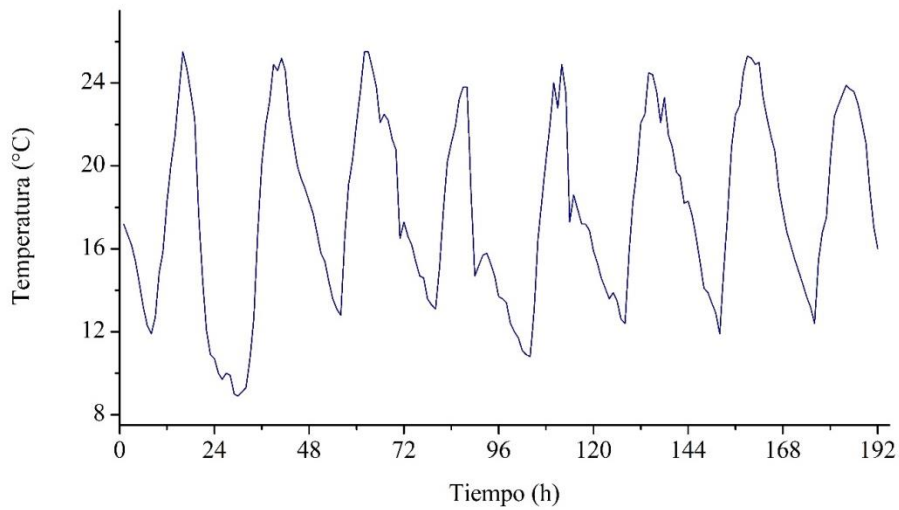


Figura 3.13 Temperatura ambiente en el periodo del 12 al 19 de marzo de 2022

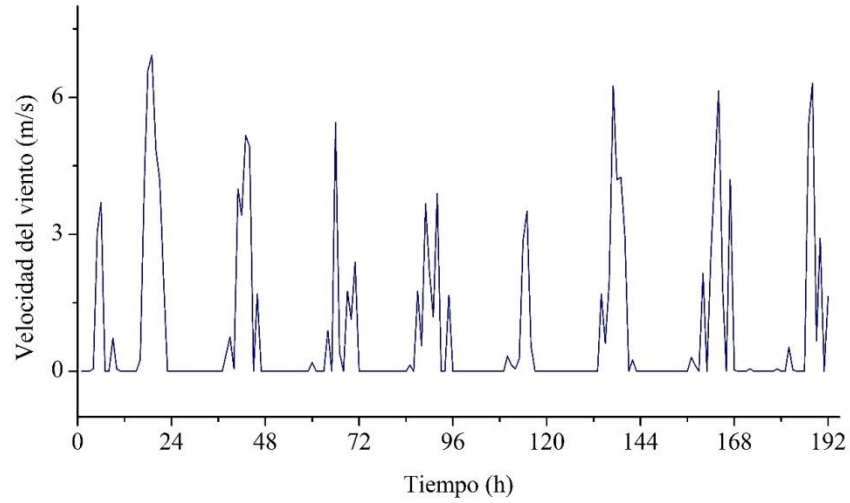


Figura 3.14 Velocidad del viento en el periodo del 12 al 19 de marzo de 2022

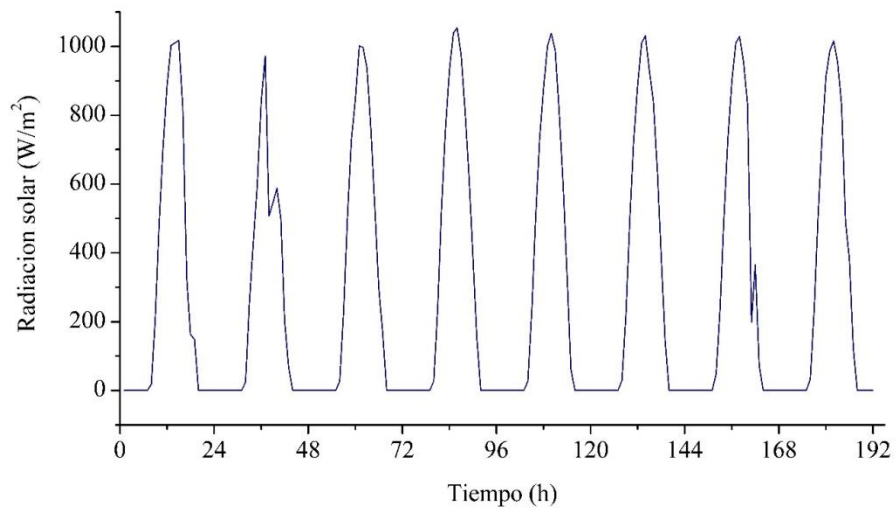


Figura 3.15 Radiación solar en el periodo del 21 al 28 de marzo de 2022

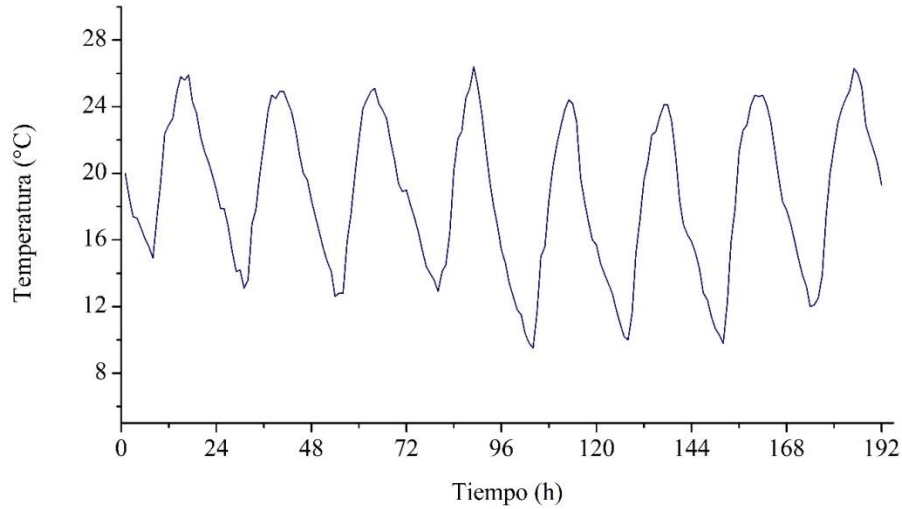


Figura 3.16 Temperatura ambiente en el periodo del 21 al 28 de marzo de 2022

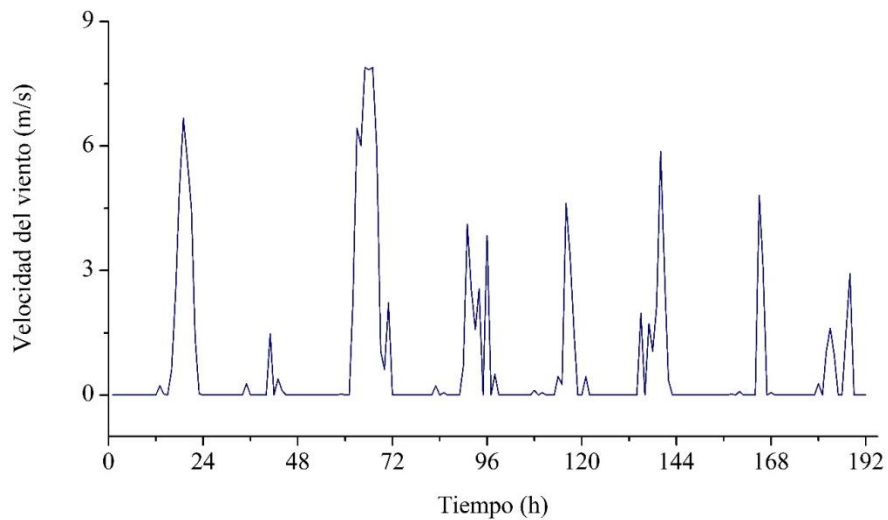


Figura 3.17 Velocidad del viento en el periodo del 21 al 28 de marzo de 2022.

3.4 Resultados Experimentales

En esta sección se presentan los resultados de las pruebas realizadas con los modelos experimentales para los tres periodos. En la [Figura 3.18](#) se muestra el cambio de la temperatura interior, para el primer periodo (del 23 al 30 de noviembre). Como se puede ver la temperatura interna para los dos modelos experimentales es mayor, en todo momento, a la temperatura ambiente. También se puede ver que la amplitud de oscilación de la temperatura interna del modelo experimental con azotea convencional es mayor que la

del modelo con azotea verde. Esto ocurre a pesar de que las temperaturas máximas diarias registradas son casi las mismas para los dos modelos experimentales, sin embargo, la temperatura mínima diaria es siempre menor para el modelo experimental con azotea convencional. Para la azotea verde la máxima temperatura interna es de 29.19°C y la mínima de 15.94°C , con una amplitud de 13.25°C . Para la azotea convencional se tiene una temperatura interna máxima de 30.31°C y mínima de 14.44°C , con una amplitud de 15.87°C .

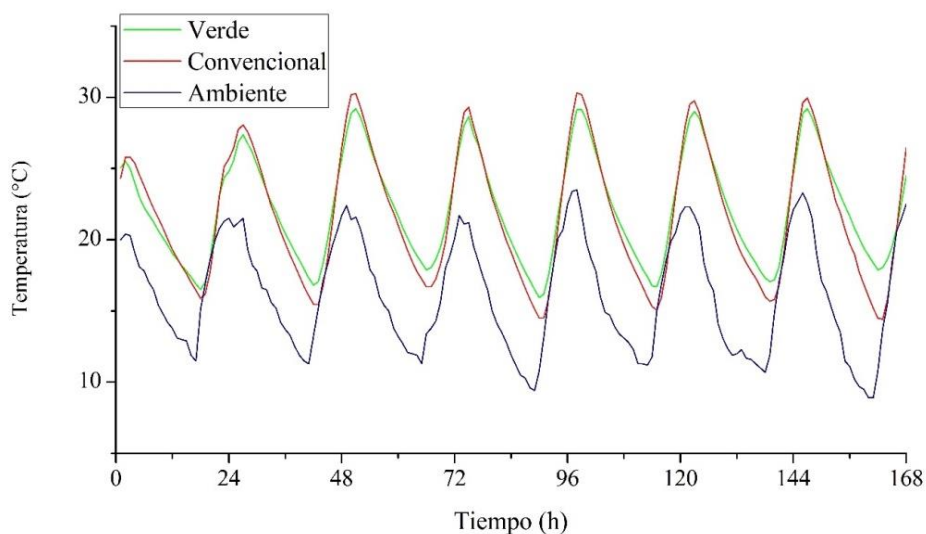


Figura 3.18 Temperatura interna registrada para los dos modelos experimentales del 23 al 30 de noviembre de 2021.

En la [Figura 3.19](#) se muestran el cambio de la temperatura interna de los dos modelos experimentales, para el segundo periodo (del 12 al 19 de marzo), se observa que la temperatura interna de ambos modelos experimentales es mayor en todo momento a la temperatura ambiente. Para la azotea verde la máxima temperatura interna es de 27°C y la mínima de 14.5°C , con una amplitud de 12.5°C . Para la azotea convencional se tiene una temperatura interna máxima de 33.13°C y mínima de 14.75°C , con una amplitud de 18.38°C .

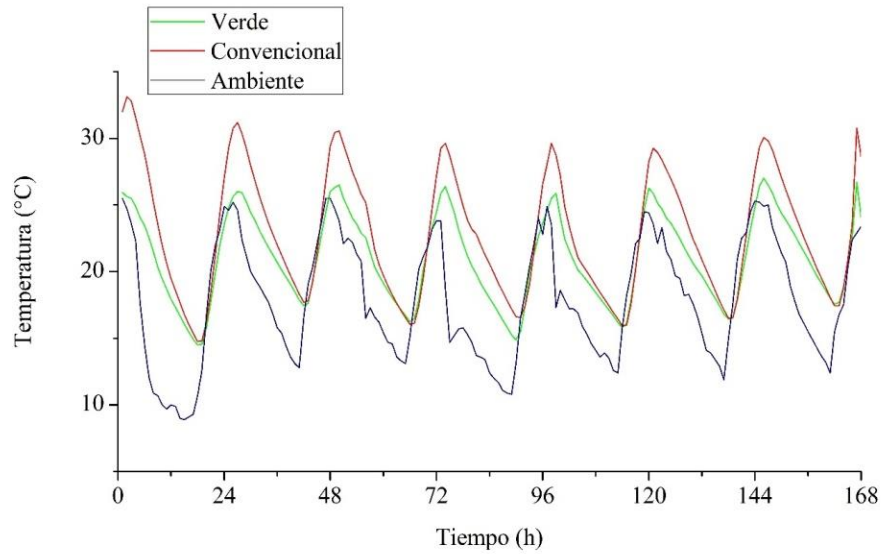


Figura 3.19 Temperatura interna registrada para los dos modelos experimentales para el 12 al 19 de marzo de 2022

La Figura 3.20 muestra el cambio de la temperatura interna utilizando hielo como medio de enfriamiento para el periodo del 21 al 28 de marzo, igualmente para las edificaciones con azotea convencional y con azotea verde. Se observa que la amplitud de oscilación de la temperatura interna de la azotea convencional es mayor que la de la azotea verde, también se tiene que la temperatura mínima de la azotea convencional es menor durante 5 días que la de la azotea verde. Para la azotea verde la máxima temperatura interna es de 25°C y la mínima de 12.81°C, con una amplitud de 12.19°C. Para la azotea convencional se tiene una temperatura interna máxima de 28.31°C y mínima de 8.13°C, con una amplitud de 20.18°C.

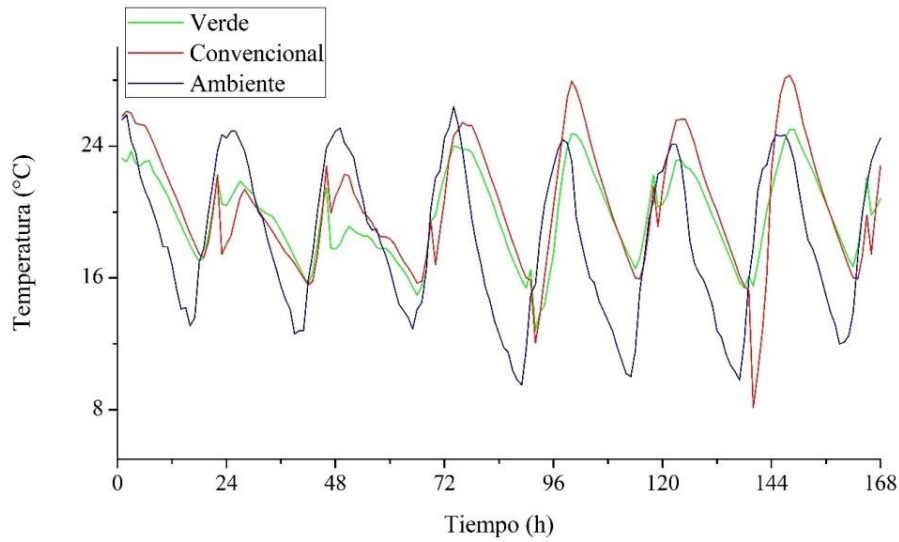


Figura 3.20 Temperatura interna registrada para los dos modelos experimentales para el 21 al 28 de marzo de 2022.

3.5. Análisis de los resultados experimentales

3.5.1. Determinación de la temperatura de confort

El estándar ASHRAE, define confort térmico como la condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico. Tomando como base los datos promedio históricos de temperatura ambiente de alrededor de 30 años del sitio (Normales Climatológicas, 2022) para la Ciudad de México y con ayuda de la Ec. (45) es posible determinar la temperatura de confort para los periodos de experimentación. Los resultados de temperatura de neutralidad se reportan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3 Resultados de la temperatura de neutralidad

Mes	T_n (°C)
Marzo	22.96
Noviembre	22.60

La temperatura de neutralidad con una aceptabilidad del 95 % corresponde a la temperatura de confort porque la Ec. (45) se relaciona con el modelo de sensación térmica de ASHRAE mostrado en la Figura 2.5.

3.5.2 Calculo del factor de climatización

Con base a la Ec. (54), los resultados del factor de climatización f_c se muestran en la Tabla 3.4

Tabla 3.4 Factor de climatización

Periodo	Azotea	
	Verde	Convencional
23 al 30 de noviembre	0.1441	0.1784
12 al 19 de marzo	0.1420	0.1790
21 al 28 de marzo	0.1482	0.1651

El factor de climatización en los tres periodos es más bajo en la azotea verde y más alto en la azotea convencional, un valor cercano a cero indica que se necesita menos energía para alcanzar la temperatura de confort y esto se logra en el modelo experimental con azotea verde, el caso contrario, es decir, los valores altos se tienen en el modelo experimental con azotea convencional, por lo que se requiere mayor cantidad de energía para llegar a la temperatura de confort.

3.5.3. Determinación de la resistencia térmica

La resistencia térmica unitaria R se relaciona con la conductividad térmica, k , y el espesor, e , de la siguiente manera:

$$R = \frac{e}{k} \quad (60)$$

La resistencia térmica total se define como:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{exterior}} + R_{\text{capa}_1} + R_{\text{capa}_2} + \dots + R_{\text{interior}} \quad (61)$$

La resistencia térmica total para la azotea convencional está dada por:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{exterior}} + R_{\text{concreto}} + R_{\text{interior}} \\ R_{\text{total}} = \frac{1}{h_{\text{exterior}}A} + \frac{e_{\text{concreto}}}{k_{\text{concreto}}A} + \frac{1}{h_{\text{interior}}A} \quad (62)$$

La resistencia térmica total para la azotea verde está dada por:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{exterior}} + R_{\text{planta}} + R_{\text{sustrato}} + R_{\text{concreto}} + R_{\text{interior}}$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_{\text{exterior}}A} + \frac{e_{\text{planta}}}{k_{\text{planta}}A} + \frac{e_{\text{sustrato}}}{k_{\text{sustrato}}A} + \frac{e_{\text{concreto}}}{k_{\text{concreto}}A} + \frac{1}{h_{\text{interior}}A} \quad (63)$$

Para poder conocer el coeficiente de convección h , se considera convección forzada en el lado exterior del modelo experimental, de acuerdo a (A. Cengel, 2002) las propiedades del aire para el rango de temperatura utilizado a 101,325 Pa se muestran en la [Tabla 3.5](#).

[Tabla 3.5](#) Propiedades del aire a 1 atm (A. Cengel, 2002)

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática m ² /s	Número de Prandtl	Conductividad térmica del aire W/m·K
5	0.00001382	0.7350	0.02401
10	0.00001426	0.7336	0.02439
15	0.00001470	0.7323	0.02476
20	0.00001516	0.7309	0.02514
25	0.00001562	0.7296	0.02551
30	0.00001608	0.7282	0.02588
35	0.00001655	0.7268	0.02625
40	0.00001702	0.7255	0.02662

El ajuste de la viscosidad cinemática del aire a 77,999.985 Pa para la ciudad de México se muestran en la [Tabla 3.6](#).

[Tabla 3.6](#) Viscosidad cinemática del aire a 77,999.985 Pa

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática m ² /s
5	0.000017952712
10	0.000018524288
15	0.000019095865
20	0.000019693423
25	0.000020290981
30	0.000020888538
35	0.000021499087
40	0.000022109635

Para efectos de cálculo del número de Reynolds y número de Nusselt, los valores de número de Prandtl y conductividad térmica del aire se toman de la [Tabla 3.5](#) a una temperatura de referencia de 20 °C, para el caso de la viscosidad cinemática se emplea el valor de la [Tabla 3.6](#) para una temperatura de referencia de 20°C.

El número de Reynolds se calcula usando la Ec. (9) y el número de Nusselt usando la siguiente ecuación:

$$Nu = 0.664 Pr^{0.33} Re^{0.5} \quad (64)$$

posteriormente se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección externa, $h_{exterior}$, con la Ec. (7). Para valores de la velocidad cercanos a cero m/s, predomina la convección natural y el valor del coeficiente de transferencia de calor por convección, $h_{exterior}$, es de 2 W/m² °C de acuerdo a (A. Cengel, 2002). Se considera que en el interior de los modelos experimentales se tiene convección natural, por lo tanto, el valor asignado para el coeficiente de transferencia de calor por convección es de 5 W/m² °C (A. Cengel, 2002).

El procedimiento se ejecuta para los 3 periodos de análisis, las [Tablas 3.7-3.9](#) muestran los resultados por día y promedios semanales de las resistencias totales para cada uno de los periodos de estudio.

[Tabla 3.7](#) Resistencias diarias para el periodo del 23 al 30 de noviembre.

Dia	Resistencia total azotea convencional (°C/W)	Resistencia total azotea verde (°C/W)
1	10.056818	13.54374
2	9.8216477	13.30857
3	9.1836565	12.670579
4	9.6201123	13.107034
5	9.8729336	13.359856
6	9.3428298	12.829752
7	9.6607019	13.147624
Promedio	9.651242871	13.13816501

Tabla 3.8 Resistencias diarias para el periodo del 12 al 19 de marzo.

Dia	Resistencia total azotea convencional (°C/W)	Resistencia total azotea verde (°C/W)
1	9.07280442	12.5597266
2	9.36912374	12.8560459
3	9.22936836	12.7162905
4	9.23736368	12.7242858
5	9.40420981	12.8911319
6	9.23763329	12.7245554
7	9.22338064	12.7103028
Promedio	9.25341199	12.7403341

Tabla 3.9 Resistencias diarias para el periodo del 23 al 30 de marzo.

Dia	Resistencia total azotea convencional (°C/W)	Resistencia total azotea verde (°C/W)
1	9.17061638	12.6575385
2	9.56332678	13.0502489
3	9.02622471	12.5131468
4	9.19858257	12.6855047
5	9.32783505	12.8147572
6	9.39916379	12.8860859
7	9.44670561	12.9336277
Promedio	9.30463641	12.7915586

Los valores promedio de las resistencias térmicas obtenidas son mayores en una edificación con azotea verde que en una edificación con azotea convencional debido principalmente a que tiene un número mayor de capas (concreto, sustrato y plantas), lo que lo hace más aislante. Además, se observa que las resistencias térmicas cambian debido a las intermitencias climáticas principalmente a la velocidad del viento. Para una determinada hora se tiene que, para una velocidad baja, la resistencia térmica es alta, por el contrario, para una velocidad de viento alta se obtiene una resistencia térmica baja, por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor será mayor. Es por eso que en la convección forzada hay una mayor transferencia de calor que en la convección natural.

Capítulo 4

Casos de estudio

En esta sección se presentan dos casos de estudio para dos diferentes edificaciones, una de ellas ubicada en la Ciudad de México y la otra ubicada en Veracruz. En ambos casos se considera a las edificaciones con azotea convencional y posteriormente se considera la implementación de una azotea verde en cada una de ellas. Con ayuda del software Revit se determina el potencial de ahorro de energía eléctrica debido a la utilización de un sistema de aire acondicionado en ambas edificaciones.

Para el análisis de los dos casos de estudio, la Ciudad de México y Veracruz, se utiliza el software Revit, que es software tipo BIM (Building Information Modeling), su modelado en 3D muestra todo el proceso del ciclo de vida de una edificación incluyendo la construcción y la operación del inmueble. Revit permite el desarrollo de proyectos arquitectónicos, estructurales y de sistemas (eléctrico, hidráulico, mecánico, aire acondicionado) donde se puede visualizar y trabajar por separado cada disciplina para profesionistas de arquitectura, ingenieros mecánicos, eléctricos, civiles, ambientales, etc. En este caso con el uso de Revit, se obtiene las cargas térmicas y el dimensionamiento del sistema de aire acondicionado ([REVIT, 2022a](#))

Con el software Revit es posible determinar las cargas térmicas en las edificaciones, lo cual permite seleccionar la capacidad de remoción de calor del sistema de aire acondicionado, posteriormente se determina el consumo de energía eléctrica y la diferencia de ambos consumos eléctricos es el potencial de ahorro de energía por la implementación de una azotea verde.

A continuación, se describen los dos casos de estudio realizados para la Ciudad de México y para Veracruz.

4.1 Descripción del caso de estudio para la Ciudad de México

La edificación se encuentra ubicada en la Ciudad de México en la alcaldía Iztapalapa, como se muestra en la [Figura 4.1](#).

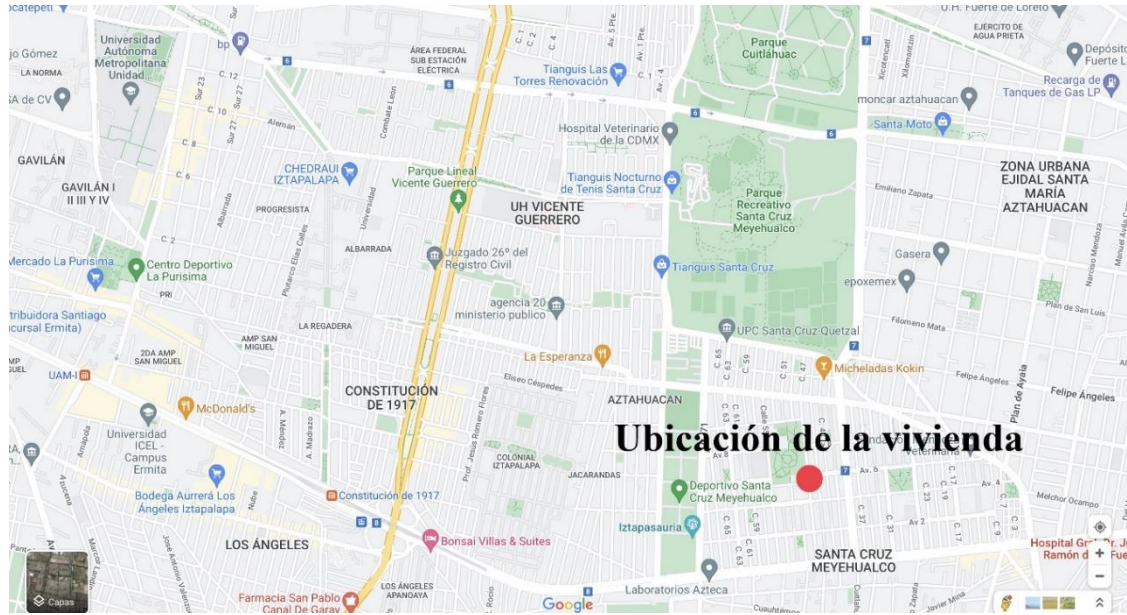


Figura 4.1 Ubicación de la edificación en la alcaldía Iztapalapa
 (9°20′45.42″N, 99°02′32.97″W) (Google Earth, 2022)

La edificación consta de: 6 habitaciones, cocina y 2 baños. Las dimensiones de la habitación 1 son de 5×6 m, la habitación 2 de 6×4 m, la habitación 3 de 5×4 m, el baño del primer nivel de 2×2.5 m, las dimensiones de la cocina de 4×6 m. Para el segundo nivel se tiene que las dimensiones de la habitación 4 y 5 son de 5×4 m, la habitación 6 de 3.65×4 m y el baño de 2×2.5 m, las Figuras 4.2 y 4.3 muestran la distribución de la edificación. Los materiales de construcción son: losa y paredes de concreto ligero, puertas de madera y ventanas de vidrio, las propiedades térmicas de estos materiales se muestran en la Tabla 4.1 y la Tabla 4.3 muestra los espesores de los materiales.

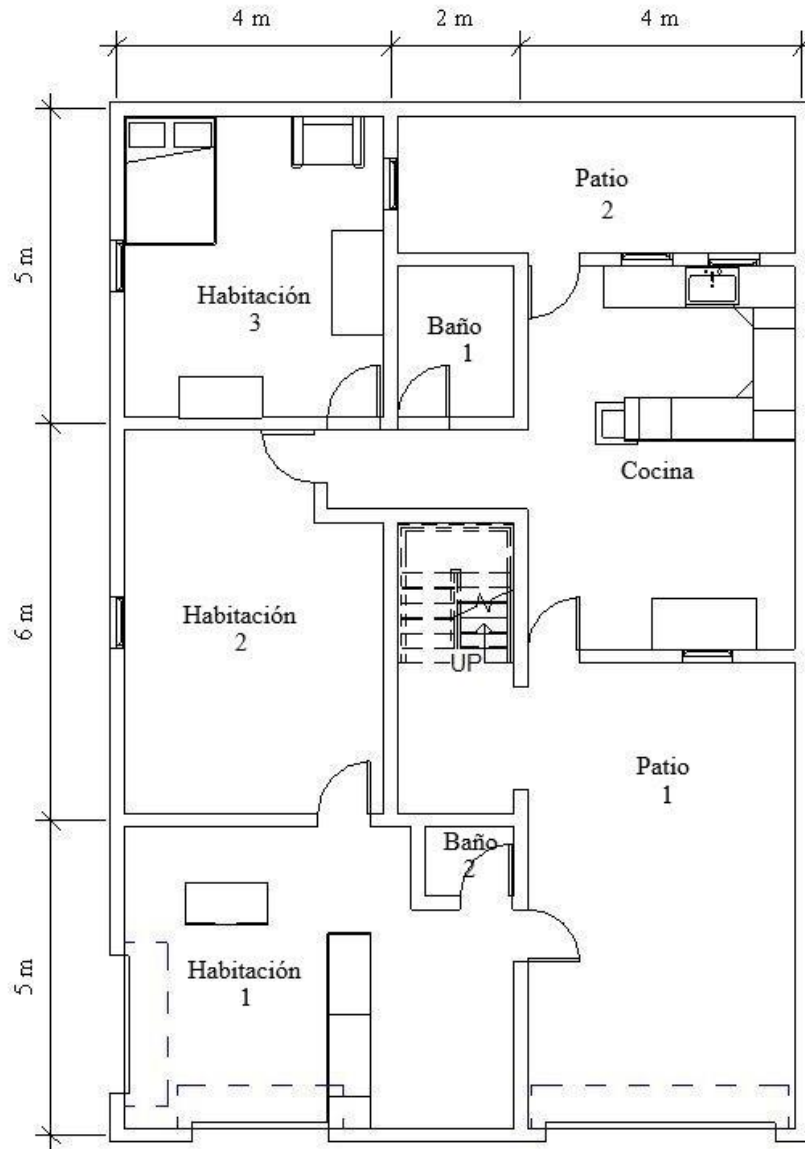


Figura 4.2 Plano arquitectónico de la edificación en la Ciudad de México, planta baja.

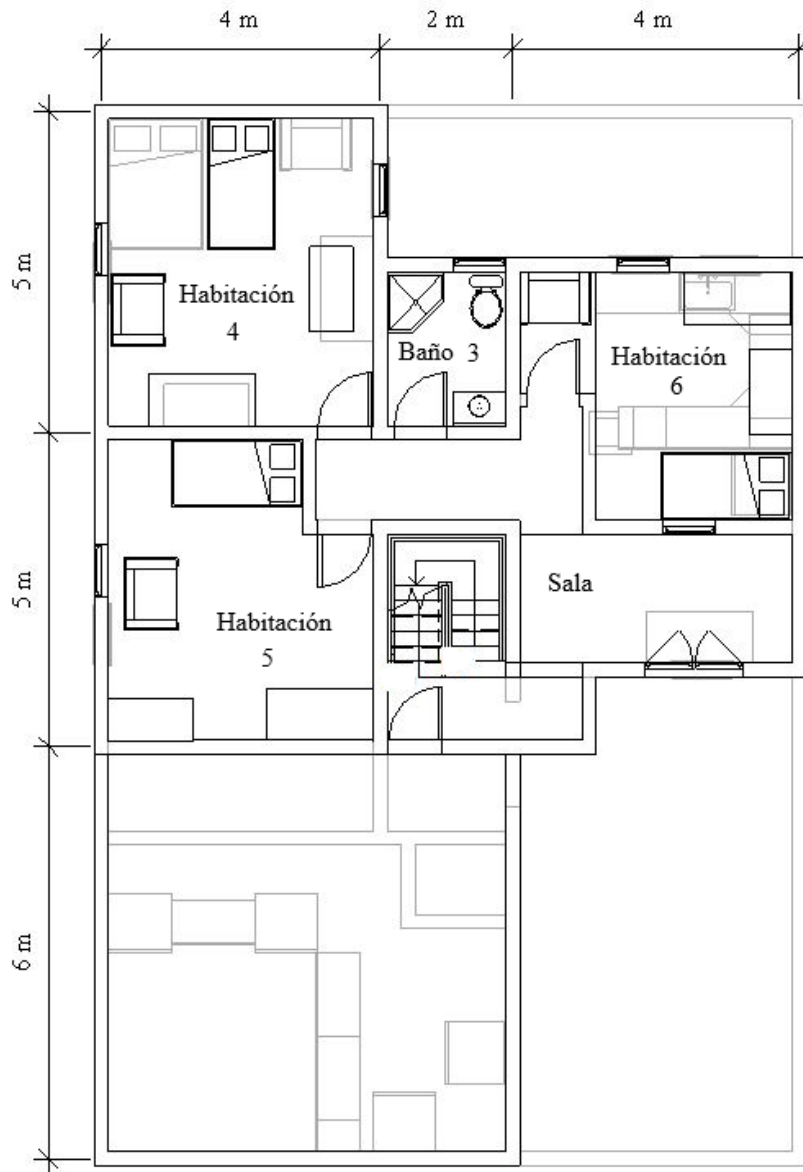


Figura 4.3 Plano arquitectónico de la edificación en la Ciudad de México, planta alta.

Tabla 4.1 Propiedades térmicas de materiales de la edificación del caso de estudio de la Ciudad de México.

Material	C_p (J kg ⁻¹ C ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Planta	4183.0	998.30	0.58
Suelo	1046.0	1300	0.8370
Concreto	657.0	950	0.2090
Vidrio	840	2480	1.1
Madera	190	496	0.12

En la [Figura 4.4](#) se muestra el recorrido del sol sobre la edificación.

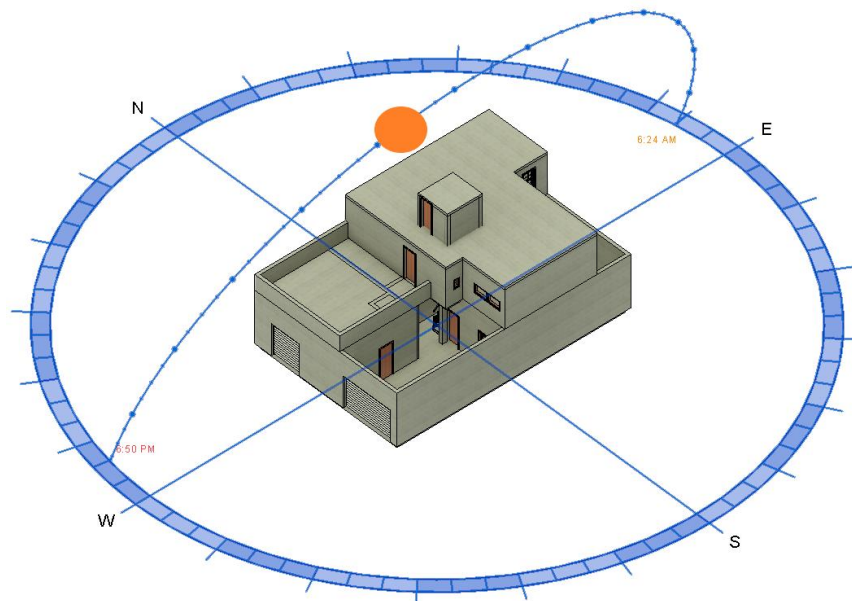


Figura 4.4 Recorrido del sol a lo largo de la vivienda para el caso de estudio en la Ciudad de México ([REVIT, 2022b](#)).

La edificación con azotea verde del caso de estudio para la Ciudad de México se observa en la [Figura 4.5](#).

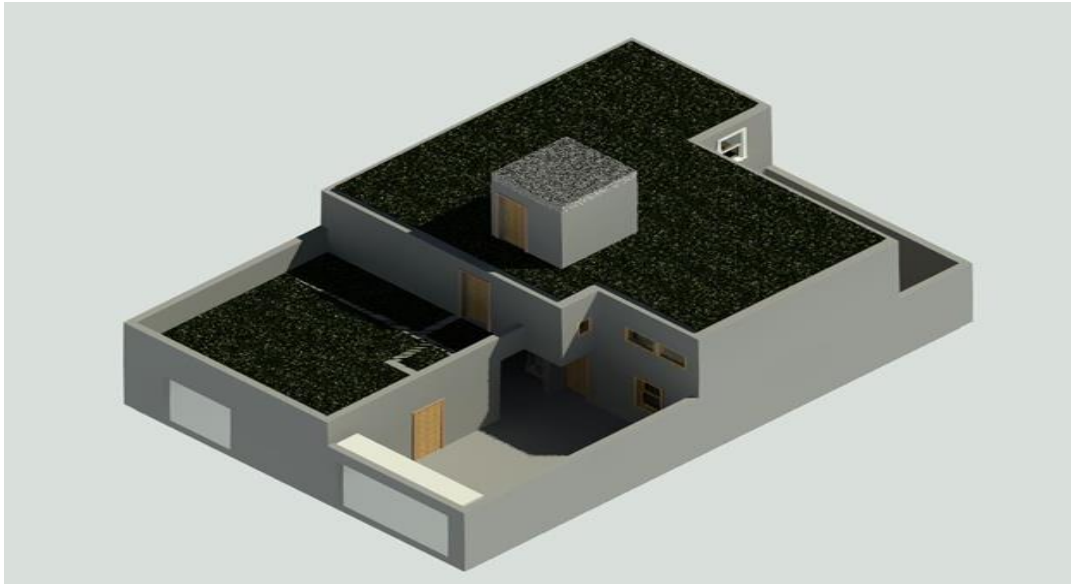


Figura 4.5 Edificación con azotea verde para el caso de estudio en la Ciudad de México en 3D.

4.2 Condiciones climáticas para el caso de estudio de la Ciudad de México

El software comercial Revit vincula mediante coordenadas geográficas la posición actual del edificio propuesto en donde se muestra su ubicación con la estación meteorológica más próxima, en este caso es el Aeropuerto Internacional Benito Juárez. Estas estaciones meteorológicas tienen valores asociados predeterminados basados en datos históricos recabados y Revit utiliza por defecto estos datos históricos.

Cabe hacer notar que el usuario no puede visualizar las variables climatológicas de las estaciones meteorológicas, simplemente puede visualizar las temperaturas de diseño de enfriamiento como muestra la Figura 4.6.

Location Weather and Site

Location	Weather	Site										
<input checked="" type="checkbox"/> Use closest weather station (MEXICO CITY/JUAREZ)												
Cooling Design Temperatures												
	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dry Bulb	24 °C	26 °C	28 °C	29 °C	30 °C	29 °C	26 °C	26 °C	26 °C	26 °C	25 °C	25 °C
Wet Bulb	13 °C	14 °C	15 °C	15 °C	16 °C	17 °C	16 °C	17 °C	17 °C	16 °C	15 °C	14 °C
Mean Daily Range	15 °C	15 °C	15 °C	15 °C	14 °C	12 °C	10 °C	11 °C	10 °C	12 °C	14 °C	15 °C

Figura 4.6 Temperaturas de diseño de enfriamiento para la Ciudad de México.

Por lo tanto, para el presente estudio se utilizan las condiciones que da por default Revit para la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional Benito Juárez. El estudio se realiza para un año promedio según la base de datos históricos de Revit y determina la mayor carga térmica que se debe de superar para el dimensionamiento del equipo de aire acondicionado.

4.3 Descripción del caso de estudio para Veracruz, México

En este caso, la edificación se encuentra ubicada en el municipio de Playa Vicente en el Estado de Veracruz, México, como se muestra en la [Figura 4.7](#).



Figura 4.7 Ubicación de la edificación en el Municipio de Playa Vicente, Veracruz ($17^{\circ}43'27.38''N$, $95^{\circ}40'45.81''W$). ([Google Earth, 2022](#)).

La vivienda consta de 2 habitaciones y de una cocina, las dimensiones de las habitaciones son de $4.3\text{ m} \times 7\text{ m}$ (habitación 1) y de $5\text{ m} \times 4.8\text{ m}$ (habitación 2), las medidas de la cocina son $5\text{ m} \times 4\text{ m}$, la casa tiene una altura de 3 m, como lo muestra la [Figura 4.8](#). Los materiales de construcción son losa de concreto ligero, paredes de ladrillo, puertas de madera y ventanas vidrio, las propiedades térmicas de estos materiales se muestran en la [Tabla 4.2](#) y la [Tabla 4.3](#) muestra los espesores de los materiales.

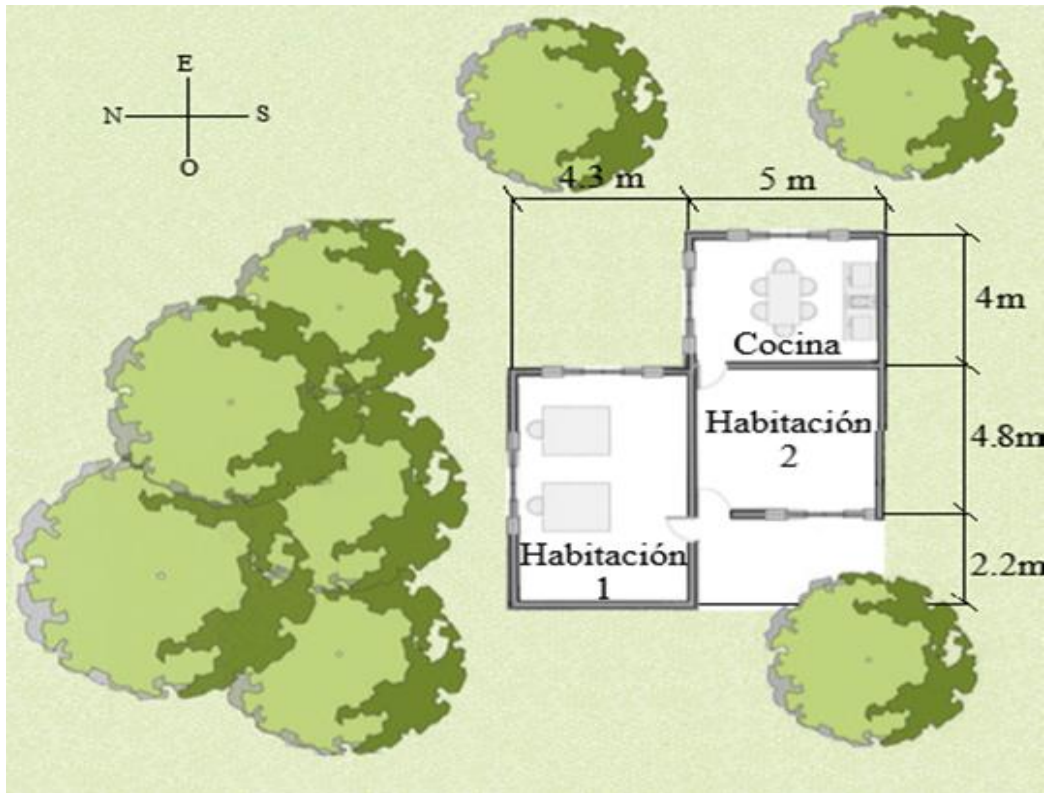


Figura 4.8 Plano de la vivienda para el caso de estudio en Veracruz.

En la Figura 4.9 se muestra la posición de la edificación del caso de estudio en Veracruz y el recorrido del sol.

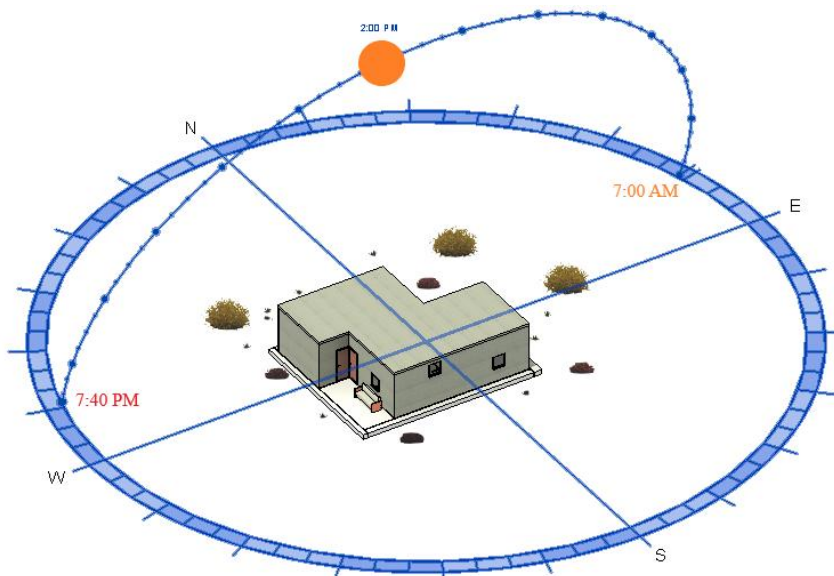


Figura 4.9 Recorrido del sol a lo largo de la vivienda para el caso de estudio en Veracruz (REVIT, 2022b).

La edificación con azotea verde del caso de estudio para Veracruz se muestra en la [Figura 4.10](#)



[Figura 4.10](#) Edificación con azotea verde para el caso de estudio en Veracruz en 3D.

[Tabla 4.2](#) Propiedades térmicas de materiales de la edificación del caso de estudio de Veracruz.

Material	C_p (J kg ⁻¹ C ⁻¹)	ρ (kg m ⁻³)	k (W m ⁻¹ K ⁻¹)
Planta	4183.0	998.30	0.58
Suelo	1046.0	1300	0.8370
ladrillo	657.0	1550	0.54
Vidrio	840	2480	1.1
Madera	190	496	0.12

[Tabla 4.3](#) Espesores de los materiales de las edificaciones con azotea verde para los casos de estudio de la Ciudad de México y Veracruz.

Vegetación (Planta)	0.05 m
Sustrato	0.05 m
Concreto	0.15 m

4.4 Condiciones climáticas para el caso de estudio de Veracruz

El software comercial Revit vincula mediante coordenadas geográficas la posición actual del edificio propuesto en donde se muestra su ubicación con la estación meteorológica más próxima que en este caso es el Aeropuerto Internacional General Heriberto Jara, Veracruz.

Location Weather and Site

Location Weather Site

Use closest weather station (GEN. HERIBERTO JARA)

Cooling Design Temperatures

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Dry Bulb	30 °C	31 °C	34 °C	36 °C	36 °C	35 °C	34 °C	34 °C	34 °C	33 °C	32 °C	30 °C
Wet Bulb	25 °C	25 °C	26 °C	27 °C	28 °C	28 °C	28 °C	28 °C	28 °C	27 °C	26 °C	25 °C
Mean Daily Range	9 °C	9 °C	10 °C	9 °C	9 °C	8 °C	8 °C	8 °C	8 °C	8 °C	8 °C	8 °C

Figura 4.11 Temperaturas de diseño de enfriamiento para Veracruz.

4.5 Resultados

En esta sección se presentan los resultados de los casos de estudio. En la primera parte se obtiene la carga térmica y el potencial de ahorro de energía, debido a la implementación de una azotea verde, para el caso de la Ciudad de México, en la segunda parte se muestran los resultados para Veracruz.

4.5.1 Caso de estudio de la Ciudad de México

4.5.1.1 Determinación de la carga térmica para el caso de estudio de la Ciudad de México

Para iniciar con la ejecución del software Revit, se requiere aplicar los siguientes aspectos:

- Ubicación del proyecto como se indica en la [Figura 4.1](#)
- Utilizar las temperaturas de enfriamiento de diseño vinculadas a la estación meteorológica, mismas que son obtenidas automáticamente como se indica en la [Figura 4.6](#)
- Orientación de la vivienda hacia el norte como se indica en la [Figura 4.4](#)
- Materiales de la vivienda como se indica en la [Tabla 4.1](#) y [Tabla 4.3](#)
- Definir los espacios de los planos arquitectónicos como se indica en la [Figura 4.2](#) y [Figura 4.3](#)
- Definir el tipo de condición, en este caso es enfriar

- Definir si el espacio es ocupable, en este caso es sí
- Definir si el espacio está lleno de personas, en este caso no
- Número de personas que habitan la vivienda en total, en este caso son 2
(La carga térmica total de una persona sentada con trabajo ligero es de 130 W)
(ASHRAE, 2017)
- Tipo de edificación, en este caso es unifamiliar

Después de aplicar los aspectos mencionados, se ejecuta el software Revit, considerando las edificaciones con azotea verde y convencional. Los resultados de las cargas térmicas correspondientes se muestran en la [Tabla 4.4](#).

Tabla 4.4 Cargas térmicas de enfriamiento para la Ciudad de México.

Tipo de azotea	Máxima carga térmica de enfriamiento anual (W)
Verde	7,527
Convencional	10,030

(REVIT, 2022a)

La [Tabla 4.4](#) muestra las máximas cargas térmicas que se tienen durante el año las cuales deben ser capaz de ser removidas por el sistema de aire acondicionado, el software Revit reporta que dichas cargas se presentan en el mes de junio.

4.5.1.2 Determinación del potencial de ahorro por enfriamiento

Una vez que ambos modelos con y sin azotea verde han sido analizados y se tiene la carga de enfriamiento (la cantidad de energía que se necesita remover) se calcula el potencial de ahorro que se puede obtener al aplicar esta estrategia para todos los meses del año. Se selecciona el sistema de aire acondicionado para cada una de las edificaciones con azotea verde y convencional consideradas en el análisis. Para la carga térmica correspondiente de la edificación con azotea verde se selecciona una unidad comercial de aire acondicionado de 28,400 BTU (8,323.21 W), que tiene una demanda eléctrica de 2,550 W y por lo tanto el equipo tiene un COP de 3.264. Para la azotea convencional se tiene un sistema de aire acondicionado de 40,000 BTU (10,550.55 W) con una demanda eléctrica de 3,800 W y por lo tanto un COP de 2.776. Ambos equipos seleccionados cumplen con las necesidades de carga térmica de acuerdo con la [Tabla 4.4](#). Para obtener el consumo eléctrico para cada tipo edificación se debe multiplicar la potencia eléctrica por las horas de operación del equipo de aire acondicionado, éstas se obtienen con el software BIOSOL ([Almanza et al., 2013](#)), el cual permite obtener las temperaturas horarias mensuales de cada mes a lo largo del año utilizando como información de entrada las temperaturas normales de una serie histórica de 1981 a 2010 ([Normales Climatológicas, 2022](#)), el criterio adoptado para determinar las

horas de operación del aire acondicionado es cuando se supere la temperatura de neutralidad, T_n , o temperatura de confort. La [Tabla 4.5](#) muestra las temperaturas de neutralidad para la Ciudad de México, la [Tabla 4.6](#) muestra las horas de uso de aire acondicionado y la [Tabla 4.7](#) muestra los resultados de los consumos eléctricos.

Tabla 4.5 Temperatura de neutralidad o de confort para cada mes en la Ciudad de México.

Temperaturas de neutralidad (°C)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
22.02	22.54	22.96	23.59	23.82	23.82	23.46	23.45	23.35	23.11	22.60	22.27

Tabla 4.6 Horas estimadas por uso del aire acondicionado en la Ciudad de México.

0:00	9.3	10.6	11.7	13.7	14.6	15.4	14.7	14.7	14.7	13.6	11.6	10.7
1:00	8.4	9.7	10.8	12.8	13.9	14.8	14.1	14.1	14.2	12.9	10.8	9.8
2:00	7.6	8.9	10.1	12.2	13.3	14.3	13.7	13.6	13.7	12.3	10.1	9.1
3:00	7.0	8.3	9.4	11.6	12.8	13.9	13.3	13.3	13.3	11.8	9.5	8.5
4:00	6.4	7.7	8.9	11.1	12.4	13.6	13.0	12.9	13.0	11.4	9.1	8.0
5:00	6.0	7.3	8.5	10.7	12.1	13.3	12.8	12.7	12.8	11.1	8.7	7.6
6:00	5.6	6.9	8.2	9.3	11.0	12.6	12.1	11.8	11.8	10.9	8.4	7.3
7:00	4.6	6.2	8.1	11.3	13.4	14.8	14.0	13.3	12.8	10.5	7.5	6.3
8:00	7.2	9.4	11.8	15.4	17.4	18.1	17.0	16.3	15.2	13.0	10.0	8.5
9:00	11.5	14.0	16.6	19.9	21.5	21.5	20.0	19.4	18.2	16.5	13.8	12.3
10:00	15.9	18.5	20.9	23.9	24.9	24.2	22.4	22.1	20.9	19.8	17.7	16.3
11:00	19.5	22.1	24.2	26.7	27.2	26.0	24.0	23.9	22.8	22.4	20.9	19.6
12:00	22.0	24.4	26.2	28.2	28.3	26.8	24.8	24.9	24.0	24.0	23.1	21.9
13:00	23.2	25.4	26.9	28.6	28.5	26.9	24.9	25.1	24.4	24.7	24.1	23.0
14:00	23.4	25.4	26.7	28.2	27.9	26.3	24.4	24.8	24.1	24.6	24.2	23.2
15:00	22.7	24.6	25.7	27.0	26.8	25.4	23.6	23.9	23.5	24.0	23.6	22.7
16:00	21.5	23.2	24.2	25.5	25.3	24.1	22.5	22.9	22.5	22.9	22.5	21.6
17:00	19.9	21.5	22.4	23.4	23.7	22.8	21.3	21.7	21.4	21.6	21.0	20.2
18:00	18.2	19.7	20.6	22.0	22.1	21.4	20.1	20.4	20.2	20.3	19.5	18.6
19:00	16.4	17.8	18.8	20.2	20.5	20.1	18.9	19.2	19.1	18.9	17.9	17.0
20:00	14.7	16.1	17.0	18.6	19.0	18.9	17.9	18.1	18.0	17.6	16.4	15.5
21:00	13.1	14.5	15.4	17.1	17.7	17.8	16.9	17.0	17.0	16.4	15.0	14.1
22:00	11.7	13.0	14.0	15.8	16.5	16.9	16.0	16.1	16.2	15.3	13.7	12.8
23:00	10.4	11.7	12.8	14.7	15.5	16.1	15.3	15.3	15.4	14.4	12.6	11.6
hora \ mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

Tabla 4.7 Potencial de ahorro de energía eléctrica por aire acondicionado para la Ciudad de México.

Mes	Días	Horas diarias estimadas de uso	Horas mensuales estimadas de uso	Consumo eléctrico kWh/mes		Potencial de ahorro kWh/mes
				Convencional	Verde	
Ene	31	3	93	353.4	237.1	116.2
Feb	28	5	140	532.0	357.0	175.0
Mar	31	6	186	706.8	474.3	232.5
Abr	30	7	210	798.0	535.5	262.5
May	31	7	217	824.6	553.3	271.2
Jun	30	7	210	798.0	535.5	262.5
Jul	31	5	155	589.0	395.2	193.7
Ago	31	5	155	589.0	395.2	193.7
Sep	30	4	120	456.0	306.0	150.0
Oct	31	4	124	471.2	316.2	155.0
Nov	30	4	120	456.0	306.0	150.0
Dic	31	3	93	353.4	237.1	116.2

El potencial de ahorro estimado de energía eléctrica corresponde a la diferencia de los consumos en kWh/mes entre la azotea convencional y la azotea verde y se reporta mensualmente en la [Tabla 4.7](#), por lo tanto, el ahorro anual es de 2,278.5 kWh.

4.5.2 Caso de estudio de Veracruz

4.5.2.1 Determinación de la carga térmica para el caso de estudio de Veracruz

Para iniciar con la ejecución del software Revit, se requiere aplicar los siguientes aspectos:

- Ubicación del proyecto como se indica en la [Figura 4.7](#)
- Utilizar las temperaturas de enfriamiento de diseño vinculadas a la estación meteorológica, mismas que son obtenidas automáticamente como se indica en la [Figura 4.11](#)
- Orientación de la vivienda hacia el norte como se indica en la [Figura 4.9](#)
- Materiales de la vivienda como se indica en la [Tabla 4.2](#) y [Tabla 4.3](#)

- Definir los espacios del plano arquitectónico como se indica en la [Figura 4.8](#)
- Definir el tipo de condición, en este caso es enfriar
- Definir si el espacio es ocupable, en este caso es si
- Definir si el espacio está lleno de personas, en este caso es no
- Número de personas que habitan la vivienda en total, en este caso es 1
- Tipo de edificación, en este caso es unifamiliar

Después de aplicar los aspectos mencionados, se ejecuta el software Revit, considerando las edificaciones con azotea verde y convencional. Los resultados de las cargas térmicas correspondientes se muestran en la [Tabla 4.8](#).

Tabla 4.8 Cargas térmicas de enfriamiento para Veracruz.

Tipo de azotea	Máxima carga térmica de enfriamiento anual (W)
Verde	3,590
Convencional	6,389

(REVIT, 2022a)

La [Tabla 4.8](#) muestra las máximas cargas térmicas que se tienen durante el año las cuales deben de ser capaz de ser removidas por el sistema de aire acondicionado, el software Revit reporta que se presentan en el mes de mayo.

4.5.2.2 Determinación del potencial de ahorro por enfriamiento

Una vez que ambas edificaciones con y sin azotea verde han sido analizadas y se tiene la carga de enfriamiento se calcula el potencial de ahorro de energía. Para la carga térmica correspondiente de la edificación con azotea verde se selecciona una unidad de aire acondicionado de 14,000 BTU (4,103 W) que tiene una demanda eléctrica de 1,250 W y por lo tanto el equipo tiene un COP de 3.2824, para la azotea convencional se requiere un sistema de aire acondicionado de 24,000 BTU (7,033.7 W) con una demanda eléctrica de 1,600 W y por lo tanto el equipo tiene un COP de 4.39. Ambos equipos seleccionados cumplen con las necesidades de carga térmica de acuerdo con la [Tabla 4.8](#). La [Tabla 4.9](#) muestra las temperaturas de neutralidad o de confort para cada mes. Mientras que la [Tabla 4.10](#) muestra las horas de uso de aire acondicionado y la [Tabla 4.11](#) muestra los resultados de los consumos eléctricos.

Tabla 4.9 Temperaturas mensuales de neutralidad o de confort para Veracruz.

Temperaturas de neutralidad (°C)											
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
24.66	25.03	25.73	26.49	26.91	26.55	26.28	26.29	26.18	25.91	25.36	24.80

Tabla 4.10 Horas estimadas por uso del aire acondicionado para Veracruz.

0:00	19.9	20.8	22.5	24.7	26.0	25.3	24.6	24.7	24.5	23.7	22.1	20.4
1:00	19.4	20.2	21.9	24.1	25.4	24.9	24.2	24.3	24.1	23.2	21.6	19.9
2:00	19.0	19.8	21.5	23.6	25.0	24.6	23.9	24.0	23.7	22.8	21.1	19.5
3:00	18.7	19.5	21.1	23.2	24.6	24.3	23.6	23.7	23.4	22.5	20.8	19.2
4:00	18.4	19.2	20.8	22.9	24.3	24.0	23.4	23.4	23.2	22.3	20.5	18.9
5:00	18.2	18.9	20.5	22.7	24.1	23.8	23.2	23.2	23.0	22.0	20.3	18.7
6:00	18.0	18.7	20.3	21.7	23.3	23.3	22.6	22.6	22.2	21.9	20.1	18.5
7:00	17.5	18.4	20.2	23.0	25.0	24.8	24.0	23.7	23.0	21.6	19.6	17.9
8:00	18.9	20.2	22.6	25.7	27.8	27.2	26.3	25.9	24.9	23.4	21.1	19.2
9:00	21.1	22.7	25.5	28.8	30.8	29.7	28.6	28.2	27.3	25.8	23.5	21.4
10:00	23.4	25.2	28.2	31.5	33.3	31.6	30.5	30.2	29.4	28.0	25.8	23.7
11:00	25.3	27.1	30.3	33.4	34.9	32.9	31.7	31.6	31.0	29.8	27.7	25.6
12:00	26.5	28.4	31.5	34.5	35.8	33.6	32.4	32.4	31.9	30.9	29.0	26.9
13:00	27.2	28.9	32.0	34.8	35.9	33.6	32.4	32.6	32.2	31.3	29.6	27.6
14:00	27.2	28.9	31.8	34.4	35.5	33.2	32.1	32.3	32.0	31.3	29.6	27.6
15:00	26.9	28.4	31.2	33.7	34.7	32.5	31.4	31.7	31.5	30.8	29.2	27.3
16:00	26.2	27.7	30.3	32.7	33.7	31.7	30.6	30.9	30.7	30.1	28.6	26.7
17:00	25.4	26.7	29.2	31.5	32.5	30.7	29.7	30.0	29.8	29.2	27.7	25.9
18:00	24.5	25.7	28.0	30.3	31.3	29.7	28.8	29.0	28.9	28.3	26.8	25.0
19:00	23.6	24.7	26.9	29.1	30.2	28.8	27.9	28.1	28.0	27.3	25.8	24.1
20:00	22.7	23.7	25.8	28.0	29.1	27.9	27.1	27.3	27.1	26.5	24.9	23.2
21:00	21.9	22.9	24.8	27.0	28.2	27.1	26.3	26.5	26.4	25.6	24.1	22.4
22:00	21.1	22.1	23.9	26.1	27.3	26.4	25.7	25.8	25.7	24.9	23.3	21.6
23:00	20.5	21.4	23.1	25.3	26.6	25.8	25.1	25.2	25.1	24.3	22.6	21.0
hora \ mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic

Tabla 4.11 Potencial de ahorro de energía eléctrica por aire acondicionado para Veracruz.

Mes	Días	Horas diarias estimadas de uso	Horas mensuales estimadas de uso	Consumo eléctrico kWh/mes		Potencial de ahorro kWh/mes
				Convencional	Verde	
Ene	31	7	217	347.2	271.2	75.9
Feb	28	9	252	403.2	315.0	88.2
Mar	31	11	341	545.6	426.2	119.3
Abr	30	13	390	624.0	487.5	136.5
May	31	15	465	744.0	581.2	162.7
Jun	30	14	420	672.0	525.0	147.0
Jul	31	14	434	694.4	542.5	151.9
Ago	31	13	403	644.8	503.7	141.0
Sep	30	13	390	624.0	487.5	136.5
Oct	31	11	341	545.6	426.2	119.3
Nov	30	10	300	480.0	375.0	105.0
Dic	31	8	248	396.8	310.0	86.8

El potencial de ahorro estimado de energía eléctrica corresponde a la diferencia de los consumos en kWh/mes entre la azotea convencional y la azotea verde y se reporta en la [Tabla 4.11](#), por lo tanto, el ahorro anual es de 1,470.1 kWh.

Capítulo 5

Evaluación probabilística del riesgo

La evaluación probabilística del riesgo es usada para estimar el riesgo al insertar valores para determinar los escenarios de accidente, estimar que tan probable es, y cuáles son sus consecuencias. Por lo tanto, la evaluación probabilística del riesgo explica las fortalezas y debilidades de diseño y operación de sistemas en la cual involucre sistemas complejos.

En esta sección se presenta una evaluación probabilística del riesgo asociado a que en una azotea verde ocurra un accidente, en este caso un incendio que no sea contrarrestado en primer lugar por un sistema anti-incendio y que tampoco sea contrarrestado por un mal diseño en las medidas de seguridad. Con ayuda del software SAPHIRE (INL, 2021) se cuantifican los posibles escenarios que pueden provocar daño ya sea parcial (en caso de que falle el sistema contra incendio) o total (en el caso de que falle el sistema contra incendio y que las medidas de mitigación también fallen). También se cuantifica el riesgo en general de que las azoteas y muros se puedan prender y que el fuego se esparza de tal manera que cause un mal funcionamiento en la operabilidad del edificio.

A continuación, se describen los aspectos principales para hacer el análisis.

Se trata de estudiar las condiciones de seguridad de un sistema que contrarreste el incendio, para esto se dispone de los siguientes sistemas de control.

El primer sistema de mitigación del evento iniciador (incendio) consiste en un circuito de serie-paralelo conformado por 2 bombas, 2 válvulas, un tanque de agua y un aspersor.

Unido al sistema tanque-bomba está el sistema de acción contra incendio que consiste en un microcontrolador, módulo GSM, un relay y sensores, dicho sistema está instalado principalmente a la red de electricidad primaria, así como a un panel solar. El sistema integrado en su totalidad se muestra en la [Figura 5.1](#).

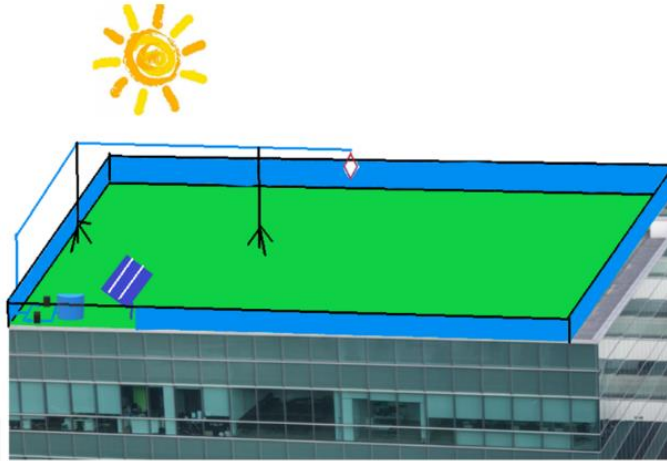


Figura 5.1. Sistema integrado total

Para iniciar con el análisis, se parte de un evento iniciador, en este caso se trata de un incendio que va a generar consecuencias y efectos no deseados, posteriormente se procede a definir un árbol de eventos. En dicho árbol de eventos se muestran los sistemas de seguridad que van a contrarrestar al evento iniciador. Estos sistemas son barreras que impiden que el evento iniciador avance y que se propague ocasionando daño. En la [Tabla 5.1](#) se muestran los modos de falla de cada componente para el sistema de mitigación 1. Donde el modo de falla RPP (Reserva probado periódicamente) indica que algunos componentes están en espera y se prueban periódicamente. Las tasas de fallas de cada componente en el sistema de alarma contra incendios son números usados genéricamente

Tabla 5.1. Modo de falla del componente.

Componente	Modo de falla	Tasa de fallas
Tanque	RPP (Reserva probado periódicamente)	4.94E-08 (Nelson-Edelstein, 2011)
Bombas	RPP	1.27E-06 (Nelson-Edelstein, 2011)
Válvulas	RPP	1.57E-08 (Nelson-Edelstein, 2011)
Aspersor	RPP	1.57E-08 (Nelson-Edelstein, 2011)
Sensores	RPP	0.0032 (Chambers, 1972)
Microcontrolador	RPP	3.24E-03 (Lucas & Knight, 1976)
Switch relay	RPP	0.1E-06 (Industrial Automation, 2021)
Alarma	RPP	0.0032 (Chambers, 1972)
GSM Modulo	RPP	0.10E-06 (Lucas & Knight, 1976)

Dentro de las secuencias que se modelan en el programa SAPHIRE (INL, 2021), se tiene que el principal y primer sistema de contención es el sistema automático de supresión del fuego, en caso de que tenga éxito da como resultado un estado final satisfactorio (ok), debido a que se tuvo éxito no se cuantifica en el SAPHIRE (INL, 2021), el segundo estado final consiste en un daño leve, que es en caso de que el sistema de supresión de fuego falle, se tiene el sistema de la barrera antifuego, una salvaguarda para el fuego y un recubrimiento en las paredes contra el fuego que se debe implementar en la fase de diseño, en SAPHIRE (INL, 2021) se considera errores humanos, como lo muestra en la [Figura 5.2](#).

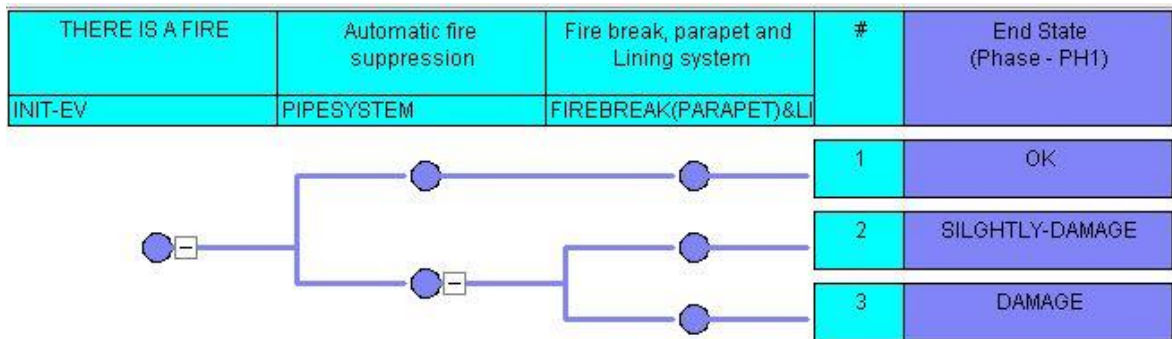


Figura 5.2. Árbol de eventos

Cada sistema de mitigación del evento iniciador tiene un árbol de fallas, en este caso son 2 árboles de fallas, el primero es el sistema de tubería y el segundo es el sistema de parapeto, un recubrimiento y salvaguarda contra el fuego. El árbol de falla del sistema de alarma, responde automáticamente al apagado de fuego y está conectado a la línea de abastecimiento de energía eléctrica, tiene como apoyo una fuente alterna de energía (panel solar), como se muestra en la [Figura 5.3](#).

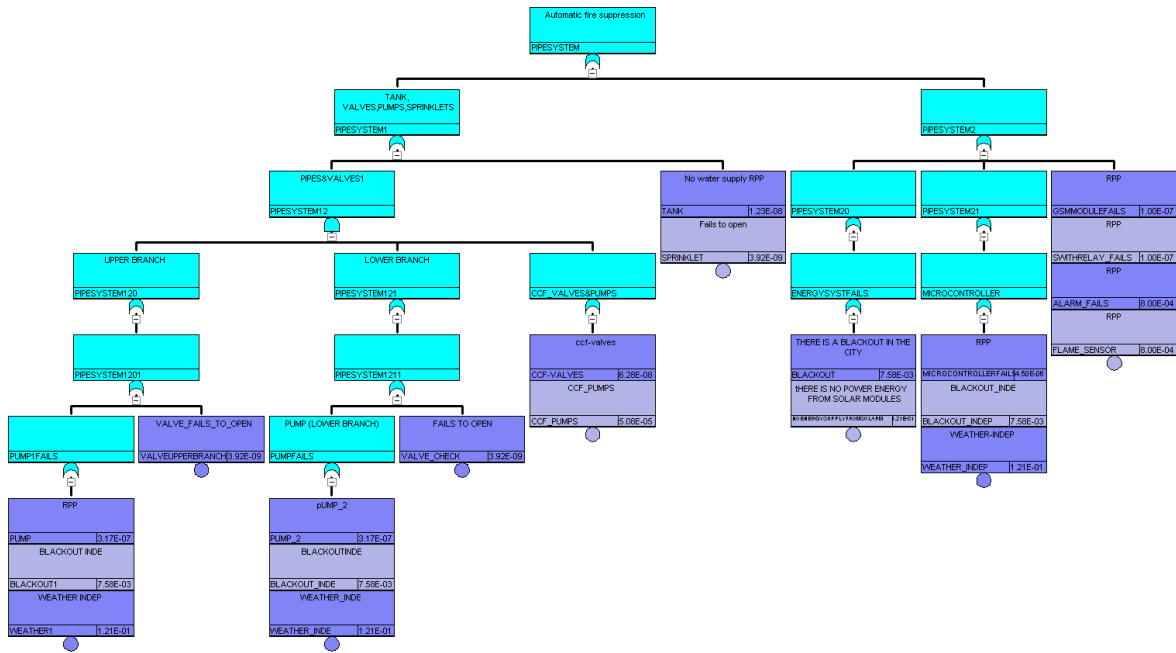


Figura 5.3. Árbol de falla del sistema de alarma.

El otro árbol de fallas se asocia con el segundo sistema de mitigación (parapeto, recubrimiento y salvaguarda) que se modela como un error humano (HEP) asociado a la fase previa de diseño antes del evento iniciador, considerando como errores de diseño humano los asociados con malas inspecciones, el árbol de fallas asociado se muestra en la Figura 5.4.

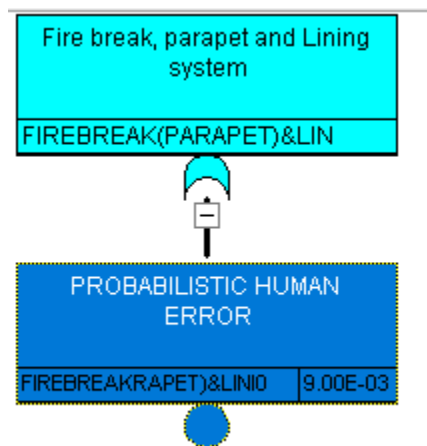


Figura 5.4. Árbol de fallas del sistema salvaguarda.

Una vez que se definieron los árboles de falla y el árbol de eventos se procede a ejecutar el análisis y se determina cada una de las frecuencias de las diferentes consecuencias no deseadas (daño leve y daño severo) obteniéndose las frecuencias de dichos acontecimientos no deseados, así como los conjuntos mínimos de corte. Los cuales son una combinación mínima de fallas necesarias para que ocurra el evento de interés. La [Tabla 5.2](#) muestra los diez conjuntos mínimos de corte más significativos los cuales representan el 99.9924%, el porcentaje restante, es decir, el 0.0076% corresponden a otros.

Tabla 5.2. Conjuntos mínimos de corte (INL, 2021)

#	Prob/Freq	Total %	Cut Set
1	0.0060700	46.3528%	init-ev,noenergysupplyfromsolar,->silghtly-damage
2	0.0060700	46.3528%	init-ev,weather_indep,->silghtly-damage
3	0.00037900	2.8942%	init-ev,blackout,->silghtly-damage
4	0.00037900	2.8942%	init-ev,blackout_indep,->silghtly-damage
5	0.00005470	0.4177%	initev,firebreakrapet)&lini0,noenergysupplyfromsolar,->damage
6	0.00005470	0.4177%	init-ev,firebreakrapet)&lini0,weather_indep,->damage
7	0.00004000	0.3055%	init-ev,alarm_fails,->silghtly-damage
8	0.00004000	0.3055%	init-ev,flame_sensor,->silghtly-damage
9	0.00000341	0.0260%	init-ev,blackout,firebreakrapet)&lini0,->damage
10	0.00000341	0.0260%	init-ev,blackout_indep,firebreakrapet)&lini0,->damage

Los resultados que se obtienen en cada secuencia del accidente son:

- La frecuencia de ocurrencia el acontecimiento de daño leve es de 0.0121
- La frecuencia de que ocurra el daño severo es de 0.000117

La segunda secuencia correspondiente a daño leve corresponde a cuando falla el sistema de alarma contra incendios lo que provocará la desaparición de la azotea verde, la tercera secuencia “daño severo” provocará una propagación del fuego hacia los vecinos o hacia otras partes de la vivienda, etc. Por otro lado, estos valores de frecuencia son aceptables ya que no se expone en riesgo a la población, considerando que estos valores son muy similares a lo que se acepta como frecuencia de accidente en la regulación nuclear menor de 1×10^{-4} , es decir 1 cada 10,000 años, además, en la industria de procesos y química se toma como un valor tolerable de accidente.

Finalmente, un diseño adecuado con mantenimiento eficiente optimiza el buen funcionamiento de la azotea verde. El mantenimiento incorrecto o la falta de mantenimiento no sólo afecta a la azotea verde sino también reduce la vida útil del sistema de seguridad, deja la vivienda insegura y los alrededores.

Capítulo 6

Conclusiones

Está demostrado que las azoteas verdes tienen la capacidad de ahorrar energía, para ello se realizaron pruebas durante tres periodos con dos modelos experimentales ubicados en la Ciudad de México, uno simula una edificación con azotea verde y el otro con azotea convencional, se mide la temperatura interior de los modelos durante siete días. Los resultados muestran que la amplitud de la oscilación de la temperatura del interior de las edificaciones es menor cuando se usa una azotea verde. Los valores bajos de la amplitud de la temperatura interior de las azoteas verdes indican una alta masa térmica y una mayor resistencia térmica lo cual ayuda a ahorrar energía por climatización. Se tiene que, para el periodo del 23 al 30 de noviembre, la azotea verde tiene una amplitud de temperatura interna de 13.25°C y la convencional de 15.87°C, para el periodo del 12 al 19 de marzo, la azotea verde tiene una amplitud de 12.5°C y la de la azotea convencional es de 18.38°C, para el periodo del 21 al 28 de marzo, los valores de la amplitud son de 12.19°C para la azotea verde y para la convencional de 20.18°C.

Otra manera de demostrar que las azoteas verdes contribuyen al ahorro de energía es mediante la determinación del factor de climatización, los resultados obtenidos en los tres periodos de análisis son más bajos para las azoteas verdes y más altos para las azoteas convencionales, por lo tanto, debido a que las azoteas verdes tienen valores más cercanos a cero indica que necesitan menos energía para alcanzar la temperatura de confort.

El potencial de ahorro de energía por enfriamiento al implementar una azotea verde se obtiene analizando dos casos, con el software Revit, uno en la Ciudad de México y otro en Veracruz, los resultados muestran que se puede ahorrar 2,278.5 kWh al año, cuyo costo es de \$ 3,707.4 (tarifa 1doméstica, CFE, 2022) para el caso de la Ciudad de México y 1,470.1 kWh al año, cuyo costo es de \$ 1,289.11 (tarifa 1C doméstica, CFE, 2022) para el caso de Veracruz.

Para analizar la frecuencia de que un incendio se desencadene al fallar el sistema de alarma contra incendios y algunas medidas de contención propuestas en guías, se realiza una evaluación de riesgo probabilística y los resultados muestran que existe una frecuencia de 0.0121 y 0.000117 de que pueda haber daño leve y severo, respectivamente. Se trata de frecuencias muy bajas, por lo que el sistema de seguridad propuesto es suficiente. Se sugiere para un futuro buscar formas de divulgación para que la población conozca sobre los beneficios de este tipo de instalación, involucrando a los diferentes niveles del gobierno, inclusive llegando a implementar políticas públicas para los nuevos proyectos de infraestructura comercial, habitacional o edificios públicos.

También, se sugiere que las azoteas verdes sean analizadas tomando en cuenta la seguridad de los diferentes riesgos involucrados, entre otros, un incendio, analizado en este documento, una inundación o un daño en la estructura de la edificación.

Referencias

- A. Cengel, Y. (2002). *Heat transfer : A Practical Approach* (Mcgraw-Hill (ed.); second). Academic.com. (2022). *Festuca ovina*. <https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/242155>
- Agency United States environmental protection. (2019). *Using green roofs to reduce heat islands*. Heat Islands. <https://www.epa.gov/heatislands/using-green-roofs-reduce-heat-islands>
- Agra, H., Klein, T., Vasl, A., Kadas, G., & Blaustein, L. (2017). Measuring the effect of plant-community composition on carbon fixation on green roofs. *Urban Forestry and Urban Greening*, 24, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.03.003>
- Aguilar, R., Kelly, E. F., & Heil, R. D. (1988). Effects of Cultivation on Soils in Northern Great Plains Rangeland. *Soil Science Society of America Journal*, 52(4), 1081–1085. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200040034x>
- Alengaram, U. J. (2022). Enunciation of lightweight and self-compacting concretes using non-conventional materials. *Handbook of Sustainable Concrete and Industrial Waste Management*, 45–62. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821730-6.00024-3>
- Almanza, R., Durán García, D., Martínez, I. G., Méndez-Arriaga, F., Morales Hesiquio, A. A., Morales-Mejía, J. C., Morales Mejía, J. C., Morillón Gálvez, D., Sánchez Pozos, M., & Preciado, Ó. (2013). *Ingeniería de la energía solar para la sustentabilidad*.
- Almeida, R., Simões, N., Tadeu, A., Palha, P., & Almeida, J. (2019). Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber. *Building and Environment*, 160, 106179. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106179>
- ANSI/SPRI VF-1. (2017). *External Fire Design Standard for Vegetative Roofs*. www.spri.org.
- Ascione, F., Bianco, N., de' Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104, 845–859. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.068>
- ASHRAE. (2017). *ASHRAE Store*. https://www.techstreet.com/ashrae/lists/ashrae_standards.tpl?ashrae_auth_token=ASHRAE.
- ASHRAE. (2021). *Home | ashrae.org*. <https://www.ashrae.org/>
- Bates, A. J., Sadler, J. P., & Mackay, R. (2013). Vegetation development over four years on two green roofs in the UK. *Urban Forestry and Urban Greening*, 12(1), 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.12.003>
- Bengtsson, L., Grahn, L., & Olsson, J. (2005). Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden. *Nordic Hydrology*, 36(3), 259–268. <https://doi.org/10.2166/nh.2005.0019>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. H., & GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. In *Applied Energy* (Vol. 115, pp. 411–428). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Berghage, R., & Montalto, F. (2006). *Hydrologic Functions of Green Roofs in New York City*. <https://www.researchgate.net/publication/251644778>
- Besir, A. B., & Cuce, E. (2018). Green roofs and facades: A comprehensive review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 82, pp. 915–939). Elsevier Ltd.

- <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.106>
- Bevilacqua, P., Bruno, R., & Arcuri, N. (2020). Green roofs in a Mediterranean climate: energy performances based on in-situ experimental data. *Renewable Energy*, *152*, 1414–1430. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.085>
- Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). Probabilistic social cost-benefit analysis for green roofs: A lifecycle approach. *Building and Environment*, *58*, 152–162. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.005>
- Bird, J., DeRosso, F., Lillquist, D., White, G., & Alder, S. (2009). *142. Side-By-Side Comparison of Two Air Sampling Media for Mycotoxins*. 142–142. <https://doi.org/10.3320/1.2758113>
- Boucher, I. (2006). Les toits verts. *Mamr*, *1*, 1–8.
- Brenneisen, S. (2003). *The benefits of biodiversity from green roofs-key design consequences*. <https://www.researchgate.net/publication/313050350>
- Britannica. (2021). *Encyclopedia Britannica | Britannica*. <https://www.britannica.com/>
- Can Ekici. (2013). A review of thermal comfort and method of using Fanger's PMV equation. *Conference Paper*.
- Carter, T., & Keeler, A. (2008). Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, *87*(3), 350–363. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.024>
- Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A., & Pérez, G. (2019). *The evapotranspiration process in green roofs: a review 1*.
- Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., & Davison, J. B. (2010). Green roofs; Building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, *42*(10), 1582–1591. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.004>
- Celik, S., & Ogus Binatli, A. (2018). *Emerging Markets Finance and Trade Energy Savings and Economic Impact of Green Roofs: A Pilot Study*. <https://doi.org/10.1080/1540496X.2018.1434620>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2003). *Termodinamica*. Mc Graw Hill. https://www.academia.edu/34082660/Termodinamica_Yunus_A_Cengel_Michael_A_Boles_Sexta_Edicion
- Chambers, E. D. (1972). *"FAILURE RATES OF AUTOMATIC FIRE DETECTION AND ALArM SYSTEMS*.
- Churchill, S. W., & Ozoe, H. (1973). Correlations for Laminar Forced Convection with Uniform Heating in Flow over a Plate and in Developing and Fully Developed Flow in a Tube. *Journal of Heat Transfer*, *95*(1), 78–84. <https://doi.org/10.1115/1.3450009>
- CivilScoops. (2022). *Density of Cement Sand and Aggregate | Density of Cement | Density of Sand | Density of Aggregate -*. <https://civilscoops.com/density/>
- ComScore. (2018). *MX City Guia Insider*. <https://mxcity.mx/>
- Coutts, A. M., Daly, E., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and Environment*, *70*, 266–276. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.08.021>
- Czemieli Berndtsson, J. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. In *Ecological Engineering* (Vol. 36, Issue 4, pp. 351–360). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.12.014>
- De Dear, R., Brager, G., & Cooper, D. (1997). *Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference*.
- Department for Communities and Local Government. (2013). *Fire Performance of Green*

- Roofs and Walls August 2013 Department for Communities and Local Government.*
www.gov.uk/dclg
- Dinsdale, S., Pearen, B., & Wilson, C. (2006). Feasibility Study for Green Roof Application on Queen's University Campus. In *commons.bcit.ca*.
<https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2012/01/queens.pdf>
- Dunnett, N., & Kingsbury, N. (2008). *Planting green roofs and living walls* (Timber Press (ed.); 2nd ed). library.wur.nl. <https://library.wur.nl/WebQuery/titel/1939498>
- Eisenman, T. S. (2006). *Raising the Bar on Green Roof Design Understanding the respiratory and allergy effects of urban trees View project*.
<https://www.researchgate.net/publication/281120418>
- EMAS. (n.d.). *Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's)*. Retrieved May 16, 2022, from <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Emilsson, T. (2008). Vegetation development on extensive vegetated green roofs: Influence of substrate composition, establishment method and species mix. *Ecological Engineering*, 33(3–4), 265–277. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.05.005>
- ENGELMANN, H., & HD, E. (1978). ZUR DOMINANZKLASSIFIZIERUNG VON BODENARTHROPODEN. ZUR DOMINANZKLASSIFIZIERUNG VON BODENARTHROPODEN.
- Farina, M. (2006). Ville de Chicago. In *Les toits verts*.
- Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010a). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6), 959–965.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.014>
- Feng, C., Meng, Q., & Zhang, Y. (2010b). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6), 959–965.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2009.12.014>
- FLL. (2002). Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen (in German) (Guidelines for planning execution and upkeep of Green roof sites). *Sociedad de Investigación Desarrollo Del Paisaje Paisajismo E.V.*
- Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. (2002). *Guidelines for the Planning, Execution and Upkeep of Green-roof sites* (B. Schulze-Ardey, C., FLL, B. Rohrbach, J., FLL, & B. Büttner, T., FLL (eds.); first).
- Gaitan, S., van de Giesen, N. C., & ten Veldhuis, J. A. E. (2016). Can urban pluvial flooding be predicted by open spatial data and weather data? *Environmental Modelling and Software*, 85, 156–171. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.007>
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2008). *Selecting Plants for Extensive Green Roofs in the United States*.
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009a). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7564–7570. <https://doi.org/10.1021/es901539x>
- Getter, K. L., Rowe, D. B., Robertson, G. P., Cregg, B. M., & Andresen, J. A. (2009b). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. *Environmental Science and Technology*, 43(19), 7564–7570. <https://doi.org/10.1021/es901539x>
- Google Earth. (2022). *Google Maps*. <https://www.google.com/maps/@19.3472082,-99.0468803,16.28z>
- Green Roof Organisation (GRO). (2014). *Green Roof Code of Best Practice for the UK 2014 The GRO Green Roof Code* (James Wilson Design). www.fll.de.

- Guiaverde.com. (2022). *Vinca major - Hierba doncella, Vincapervinca major*.
<https://www.guiaverde.com/guia-de-plantas/vinca-major-2887/>
- Hargreaves, G. H., & Allen, R. G. (2003). History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129(1), 53–63. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9437\(2003\)129:1\(53\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9437(2003)129:1(53))
- Hartig, T., Mitchell, R., De Vries, S., & Frumkin, H. (2014). Nature and health. *Annual Review of Public Health*, 35, 207–228. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-032013-182443>
- Hays, R. L. (1975). The thermal conductivity of leaves. *Planta* 1975 125:3, 125(3), 281–287. <https://doi.org/10.1007/BF00385604>
- He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N., & Zheng, S. (2017). Influence of plant and soil layer on energy balance and thermal performance of green roof system. *Energy*, 141, 1285–1299. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.064>
- Heather Shimmin. (2012, July). *A Brief History of Roof Gardens – Heather Shimmin Photography*. <http://www.heathershimmin.com/a-brief-history-of-roof-gardens>
- hk-phy.org. (2022). *Heat - Temperature and Heat - Temperature changes - Page 2*. http://www.hk-phy.org/contextual/heat/tep/temch02_e.html
- I.Griffiths. (1990). *Thermal comfort studies in buildings with passive solar features: field studies*.
- Industrial Automation, O. (2021). *General-purpose Relay: What is Failure Rate? | FAQ | Singapore | Omron IA*. https://www.omron-ap.com/service_support/FAQ/FAQ02147/index.asp
- INL. (2021). *SAPHIRE | Training Info*. <https://saphire.inl.gov/##/##about>
- IPCC. (2014). *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I,II, and III to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (L. A. Pachauri, R.K., Meyer (ed.)).
- Jaffal, I., Ouldboukhite, S. E., & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157–164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>
- JardineriaOn. (2022). *Características, usos y cuidados del Sedum acre | Jardineria On*. <https://www.jardineriaon.com/sedum-acre.html>
- Jean Côté, Pierre Blanchet, Nataliia Gerzhova, Christian Dagenais, & Sylvain Menard. (2019). *A Conceptual Framework for Modelling the Thermal Conductivity of Dry Green Roof Substrates*. https://www.researchgate.net/publication/335794130_A_Conceptual_Framework_for_Modelling_the_Thermal_Conductivity_of_Dry_Green_Roof_Substrates
- Jiang, L., & Tang, M. (2017). Thermal analysis of extensive green roofs combined with night ventilation for space cooling. In *Energy and Buildings* (Vol. 156). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.080>
- Juan Paullier. (2015). *Las azoteas verdes que oxigenan a la Ciudad de México*. BBC Mundo. https://www.bbc.com/mundo/video_fotos/2015/10/151016_mexico_ciudad_azoteas_verdes_medio_ambiente_jp#:~:text=serie de ventajas.,La capital mexicana cuenta con 34.991 metros cuadrados de azoteas,y cuatro de empresas privadas
- Kazemi, F., & Mohorko, R. (2017). Review on the roles and effects of growing media on plant performance in green roofs in world climates. In *Urban Forestry and Urban Greening* (Vol. 23, pp. 13–26). Elsevier GmbH.

- <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.02.006>
- Kirchner, J. W. (1969). Water Resources Research. *Journal of the American Water Resources Association*, 5(3), 2–2. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1969.tb04897.x>
- Köhler, M., Schmidt, M., Wilhelm Grimme, F., Laar, M., Lúcia de Assunção Paiva, V., & Tavares, S. (2002). Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics – far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health*, 13(4), 382–391. <https://doi.org/10.1108/09566160210439297>
- Kosareo, L., & Ries, R. (2007). Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7), 2606–2613. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.019>
- La Roche, P., & Berardi, U. (2014). Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82, 492–504. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.055>
- Lanham, J. K. (2007). *Thermal Performance of Green Roofs in Cold Climates*. <https://www.collectionscanada.gc.ca/obj/s4/f2/dsk3/OKQ/TC-OKQ-704.pdf>
- Lee, J., Hopmans, J. W., Rolston, D. E., Baer, S. G., & Six, J. (2009). Determining soil carbon stock changes: Simple bulk density corrections fail. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 134(3–4), 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.07.006>
- Lee, L. S. H., & Jim, C. Y. (2018). Thermal-cooling performance of subtropical green roof with deep substrate and woodland vegetation. *Ecological Engineering*, 119, 8–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.05.014>
- Liu, K., & Baskaran, B. (2003). *Thermal performance of green roofs through field evaluation*.
- Living roofs. (2021). *Introduction to types of green roofs on buildings in cities*. Types of Green Roofs. <https://livingroofs.org/introduction-types-green-roof/>
- Loder, A. (2014). “There’s a meadow outside my workplace”: A phenomenological exploration of aesthetics and green roofs in Chicago and Toronto. *Landscape and Urban Planning*, 126, 94–106. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.008>
- López-González, B. G., Camacho, A. D., Martínez-Rodríguez, M. C., & Marcelin- Aranda, M. (2020). Techos verdes: una estrategia sustentable. *Revista Tecnología En Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4389>
- Lucas, P., & Knight, L. (1976). Observed failure rates of electronic components in computer systems. *Microelectronics Reliability*, 15(3), 239–243. [https://doi.org/10.1016/0026-2714\(76\)90758-7](https://doi.org/10.1016/0026-2714(76)90758-7)
- Macfadyen, A. (1961). Improved Funnel-Type Extractors for Soil Arthropods. *The Journal of Animal Ecology*, 30(1), 171. <https://doi.org/10.2307/2120>
- MacIvor, J. S., Margolis, L., Puncher, C. L., & Carver Matthews, B. J. (2013). Decoupling factors affecting plant diversity and cover on extensive green roofs. *Journal of Environmental Management*, 130, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.014>
- Mahdiyar, A., Tabatabaee, S., Yahya, K., & Mohandes, S. R. (2021). A probabilistic financial feasibility study on green roof installation from the private and social perspectives. *Urban Forestry and Urban Greening*, 58, 126893. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126893>
- Material Property Data. (2022). *Concrete, Lightweight*. <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=cd371cbf98c843668de161c122c82960>
- Meng, Q., Zhang, Y., & Zhang, L. (2006). Measurement of the Equivalent Thermal

- Resistance of Rooftop Lawns in a Hot-Climature Wind Tunnel 1. In *China Envelope Technologies for Building Energy Efficiency*. Energy Systems Laboratory (<http://esl.tamu.edu>). <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/5517>
- Mentens, J., Raes, D., & Hermy, M. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2005.02.010>
- Mesimäki, M., Hauru, K., & Lehvävirta, S. (2019). Do small green roofs have the possibility to offer recreational and experiential benefits in a dense urban area? A case study in Helsinki, Finland. *Urban Forestry and Urban Greening*, 40(March 2018), 114–124. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.10.005>
- Nagase, A., & Koyama, S. (2020). Attractiveness and preference of extensive green roofs depend on vegetation types and past experience with plants in Japan. *Urban Forestry and Urban Greening*, 51. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126658>
- Naturalezatropical.com. (2022). *La planta Cufea o Trueno de venus, Cuphea hyssopifolia*. <https://naturalezatropical.com/cufea-cuphea-hyssopifolia/>
- Nelson-Edelstein, P. F. (2011). *Analisis Probabilistico de Seguridad de la Central Laguna Verde*.
- Normales Climatológicas. (2022). *Información Climatológica por estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=df>
- nps.gov. (2009). *What is a Green Roof—Technical Preservation Services, National Park Service*. Sustainability. <https://www.nps.gov/tps/sustainability/new-technology/green-roofs/define.htm>
- Olesen, B. W. (1995). International standards and the ergonomics of the thermal environment. *Applied Ergonomics*, 26(4), 293–302. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(95\)00033-9](https://doi.org/10.1016/0003-6870(95)00033-9)
- P. Graham, & M. Kim. (2005). *Evaluating the stormwater management benefits of green roofs through water balance modeling*.
- Paithankar, D. N., & Taji, S. G. (2020). Investigating the hydrological performance of green roofs using storm water management model. *Materials Today: Proceedings*, 32, 943–950. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.085>
- Palomo Del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2), 179–193. [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(97\)00029-7](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(97)00029-7)
- Decreto presidencial italiano, (2009).
- 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 and Buildings*, 139, 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.015>
- Ratcliffe, M. (2007). *Improving office staff productivity while reducing carbon dioxide emissions*. <http://www.cibse.org/pdfs/8aratcliffe.pdf>.
- REVIT. (2022a). *About Revit | Revit 2020 | Autodesk Knowledge Network*. <https://knowledge.autodesk.com/support/revit/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2020/ENU/Revit-GetStarted/files/GUID-D8835F8E-1330-4DBC-8A55-AF5941056C58-htm.html>
- REVIT. (2022b). *REVIT - Buscar con Google*. <https://www.google.com/search?q=REVIT&source=lmns&bih=852&biw=1745&hl=e-s->

- 419&sa=X&ved=2ahUKEwi8hOjH0eL3AhXpj2oFHVIVA2UQ_AUoAHoECAEQA
A
- Schmidt, M., Grimme, F. W., Laar, M., Ko Èhler, M., Âcia, V. L., Èa, A., Paiva, Ä., & Tavares, S. (2002). Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics-far beyond the aesthetics Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics ± far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health*, 13(4), 956–6163. <https://doi.org/10.1108/09566160210439297>
- Schrader, S., & Böning, M. (2006). Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans. *Pedobiologia*, 50(4), 347–356. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2006.06.003>
- Schweitzer, O., & Erell, E. (2014). Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 68(PARTA), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.012>
- Secretaria del medio ambiente. (2018). *NADF_013_RNAT_2017*. http://data.sedema.cdmx.gob.mx/sitios/conadf/documentos/NADF_013_RNAT_2017.pdf
- Seyedabadi, M. R., Eicker, U., & Karimi, S. (2021). Plant selection for green roofs and their impact on carbon sequestration and the building carbon footprint. *Environmental Challenges*, 4, 100119. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100119>
- Shafique, M., Xue, X., & Luo, X. (2020). An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, 47(May 2019), 126515. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>
- SIMSCALE. (2021, July 14). *What Is PMV? What Is PPD? Basics of Thermal Comfort / SimScale*. <https://www.simscale.com/blog/2019/09/what-is-pmv-ppd/>
- SmartCitiesWorld news team. (2021). *SmartCitiesWorld*. Career Building. <https://www.smartcitiesworld.net/news/news/research-highlights-growing-trends-of-green-roofs-and-green-concrete-6016>
- Sun, T., Bou-Zeid, E., Wang, Z. H., Zerba, E., & Ni, G. H. (2013). Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport. *Building and Environment*, 60, 211–224. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.018>
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. In *Energy and Buildings* (Vol. 25).
- Takakura, T., Kitade, S., & Goto, E. (2000). Cooling effect of greenery cover over a building. *Energy and Buildings*, 31(1), 1–6. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(98\)00063-2](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(98)00063-2)
- Tang, M., & Zheng, X. (2019). Experimental study of the thermal performance of an extensive green roof on sunny summer days. *Applied Energy*, 242, 1010–1021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.153>
- Tang, X., & Qu, M. (2016). Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. *Energy and Buildings*, 121, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.069>
- Taweekun, J., & Tantiwichien, A.-U.-W. (2013). *Thermal Comfort Zone for Thai People*. 5, 525–529. <https://doi.org/10.4236/eng.2013.55062>
- The Engineering ToolBox. (2021a). *Solids, Liquids and Gases - Thermal Conductivities*. https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- The Engineering ToolBox. (2021b, December 14). *Solids, Liquids and Gases - Thermal*

- Conductivities*. https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html
- Tiessen, H., Stewart, J. W. B., & Bettany, J. R. (1982). Cultivation Effects on the Amounts and Concentration of Carbon, Nitrogen, and Phosphorus in Grassland Soils 1. *Agronomy Journal*, 74(5), 831–835.
<https://doi.org/10.2134/agronj1982.00021962007400050015x>
- Urban Scape. (2016). *Do you really know all the benefits of the green roofs?*
<https://www.urbanscape-architecture.com/do-you-really-know-all-the-benefits-of-green-roofs/>
- V Szokolay, S. (2008). *Introductio to Architectural Science RThe Basis of Sutainable Design* (Second).
- Vaccari, F. P., Gioli, B., Toscano, P., & Perrone, C. (2013). Carbon dioxide balance assessment of the city of Florence (Italy), and implications for urban planning. *Landscape and Urban Planning*, 120, 138–146.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.08.004>
- Van Renterghem, T. (2018). Green roofs for acoustic insulation and noise reduction. In *Nature Based Strategies for Urban and Building Sustainability* (pp. 167–179). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812150-4.00016-1>
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2008). Numerical evaluation of sound propagating over green roofs. *Journal of Sound and Vibration*, 317(3–5), 781–799.
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.03.025>
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2009). Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. *Building and Environment*, 44(5), 1081–1087.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.07.013>
- Van Renterghem, T., & Botteldooren, D. (2011). In-situ measurements of sound propagating over extensive green roofs. *Building and Environment*, 46(3), 729–738.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.006>
- Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740–752. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.119>
- Viriyautesahakul, W., Panacharoenwong, W., Pongpiriyakijkul, W., Kosolsaksakul, S., & Nakawiro, W. (2016). A Simulation Study of Inverter Air Conditioner Controlled to Supply Reactive Power. *Procedia Computer Science*, 86, 305–308.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.083>
- Whittinghill, L. J., Rowe, D. B., Schutzki, R., & Cregg, B. M. (2014). Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems. *Landscape and Urban Planning*, 123, 41–48. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.015>
- Williams, K. J. H., Lee, K. E., Sargent, L., Johnson, K. A., Rayner, J., Farrell, C., Miller, R. E., & Williams, N. S. G. (2019). Appraising the psychological benefits of green roofs for city residents and workers. *Urban Forestry and Urban Greening*, 44, 126399.
<https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126399>
- Williams, N. S. G., Rayner, J. P., & Raynor, K. J. (2010). Green roofs for a wide brown land: Opportunities and barriers for rooftop greening in Australia. *Urban Forestry and Urban Greening*, 9(3), 245–251. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2010.01.005>
- Wolf, D., & Lundholm, J. T. (2008). Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*, 33(2), 179–186.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.02.008>
- Wong, N. H., Song, J., & Istiadji, A. D. (2006). A study of the effectiveness of mechanical

- ventilation systems of a hawker center in Singapore using CFD simulations. *Building and Environment*, 41(6), 726–733. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.03.015>
- Yao, L., Wei, W., & Chen, L. (2016). How does imperviousness impact the urban rainfall-runoff process under various storm cases? *Ecological Indicators*, 60, 893–905. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.08.041>
- Zhang, G., & He, B. J. (2021). Towards green roof implementation: Drivers, motivations, barriers and recommendations. *Urban Forestry and Urban Greening*, 58(August 2020), 126992. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.126992>
- Zhang, G., He, B. J., & Dewancker, B. J. (2020). The maintenance of prefabricated green roofs for preserving cooling performance: A field measurement in the subtropical city of Hangzhou, China. *Sustainable Cities and Society*, 61(April), 102314. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102314>