

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

FACULTAD DE ARQUITECTURA

MAESTRÍA EN ARQUITECTURA Y URBANISMO



TECHO VERDE COMO ESTRATEGIA PARA REDUCCIÓN DE TEMPERATURA

INTERIOR DE EDIFICACIONES EN REGIÓN CON CLIMA CÁLIDO

CASO: CUASIEXPERIMENTAL SOBRE LOSA DE CONCRETO ARMADO

TESIS:

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN

ARQUITECTURA Y URBANISMO

PRESENTA:

GILBERTO PÉREZ LÓPEZ

DIRECTOR:

DR. JUAN CARLOS ROJO CARRASCAL

CULIACÁN ROSALES, SINALOA, MÉXICO DICIEMBRE 2025



Universidad Autónoma de Sinaloa

Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso



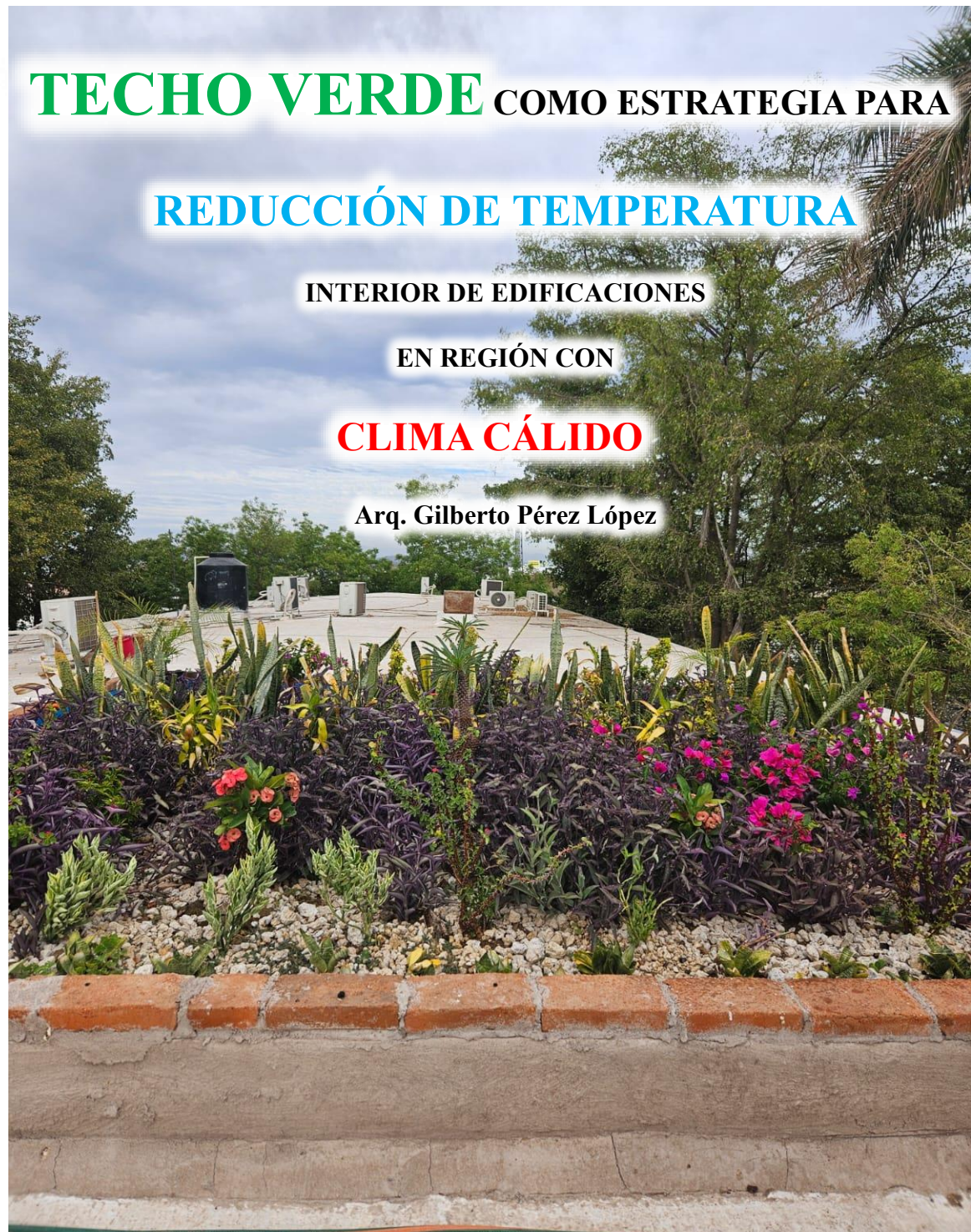
Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia [Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd.
Universitarios
C.P. 80010 Culiacán Sin. Méx.
Tel (667) 713 78 32 y
(667) 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx



“Las infraestructuras basadas en la naturaleza pueden influir en el 79% de todas las metas de la Agenda 2030” (Naciones Unidas 2024).

Dedicatoria

A la vida, por la oportunidad de aprender y superar retos.

A mi hijo, por ser el motor que me impulsa a superarme cada día y la razón de mi esfuerzo constante.

A mi madre, por su presencia incondicional, su apoyo en cada una de mis actividades, por acompañarme siempre con amor y sabiduría. También participo en el proyecto.

A mi padre, por su sabiduría y fortaleza.

A cada un@ de l@s alumn@s que estuvieron presentes en el proceso de la construcción del techo verde y se convirtieron en una parte esencial del proyecto.

A mis amigos, por su compañía, quienes creyeron en mí y me animaron a continuar cuando las dificultades se hacían presentes.



Agradecimientos

Expreso mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la culminación de este proyecto, el cual representa no solo un logro académico, sino también profesional y personal.

A mi madre, por su apoyo incondicional, su paciencia y por acompañarme en cada etapa de mi formación. Su presencia constante ha sido un pilar fundamental en mi vida.

A mi hijo, por ser la inspiración diaria que me impulsa a continuar y a superarme, incluso en los momentos de mayor exigencia.

A mi comité tutorial de tesis, por su guía, orientación y valiosas aportaciones durante el desarrollo de esta investigación, su experiencia y compromiso fueron esenciales para la consolidación de este trabajo. Agradezco especialmente la Dra. Sylvia Cristina Rodríguez González, por su constante acompañamiento y apoyo para mejorar este documento; a la Dra. Evangelina Avilez Quevedo, por ser una admirable guía y ejemplo de dedicación académica; al Dr. Gabriel Castañeda Nolasco quien me apoyo con la estancia académica fue quien me oriento para hacer el techo verde; y al Dr. Armando Núñez de Anda por su apoyo con parte del equipo de medición.

A l@s alumn@s de la Facultad de Arquitectura, a quienes estimo y aprecio enormemente, el apoyo brindado en las diferentes etapas de construcción del proyecto cuasiexperimental. Su participación fue vital para hacer posible la materialización del Techo Verde, un proceso que implicó gran esfuerzo, dedicación y trabajo en equipo.

- Carlos Alexis Guerrero Carrillo
- Kristopher Pereda Núñez
- Christian Jaziel Martínez Avendaño
- Dino Gael López Hernández
- Ulises Miguel Reyes González
- Gael Sebastián Mejía Pérez
- Miriam Hernández Vázquez
- Claudia Itzel Ureta Barrera
- Jesús Said Guzmán López
- Ana Victoria Moran Carrillo

Finalmente, agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo de beca, que hizo posible la inversión necesaria para el desarrollo de la investigación, el proyecto cuasiexperimental, la estancia académica y el equipo de medición. Asimismo, al Programa de Maestría en Arquitectura y Urbanismo del Posgrado de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por la oportunidad brindada para mi desarrollo académico y profesional.

Índice

Dedicatoria	iv
Agradecimientos	v
Índice.....	vi
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tablas	xiv
Abreviaturas, Siglas y Acrónimos.....	xv
Resumen.....	xvi
Abstract.....	xvii
Introducción	1
Planteamiento del Problema	3
Antecedentes del Problema.....	4
Antecedentes de Techos Verdes	5
Techos Verdes y su Contribución a los ODS	7
ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento.....	8
ODS 9 Industria, Innovación e Infraestructura	8
ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles.....	9
ODS 13 Acción por el Clima	9
Justificación	11
Salud y Bienestar	12
Sostenibilidad Ambiental	13
Eficiencia Energética	14
Adaptación al Cambio Climático.....	15
Beneficios Económicos.....	16
Preguntas de Investigación	18
Pregunta de Investigación Central	18
Preguntas Específicas.....	18
Hipótesis de Investigación	19
Objetivos.....	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos.....	19

Capítulo I	20
Marco Teórico Conceptual.....	20
1.1 Cambio Climático	21
1.1.1 Calentamiento Urbano y el Fenómeno de Isla de Calor Urbano	22
1.1.2 Soluciones Basadas en la Naturaleza como Respuesta Climática	23
1.2 El Clima	24
1.2.1 Sistemas Pasivos de Acondicionamiento Térmico en Arquitectura.....	28
1.2.2 Transferencia de Calor en Techos de Concreto Armado (Expuestos)..	33
1.2.3 Consideraciones Sobre Confort Térmico en Clima Cálido Seco.....	34
1.2.4 Techo Verde: lo que Plantean Algunos Autores	35
1.3 Estado del Arte.....	38
1.3.1 Comportamiento de los Techos Verdes en Climas Cálidos Secos	38
1.3.2 Parámetros, Desempeño Térmico y Rol de la Vegetación	41
1.3.3 Hidrología y Control Pluvial.....	44
1.3.4 Consideraciones Estructurales	45
1.3.5 Estándares y Guías en México.....	47
1.3.6 Componentes para los Sistemas de Techos Verdes	48
1.3.7 Clasificación de los Techos Verdes	49
1.3.7 Resumen Comparativo de Estudios Previos	53
1.4 Teorías.....	56
1.4.1 Teoría eje: Arquitectura Sustentable	56
1.4.2 Teoría de Apoyo: La Arquitectura Bioclimática	57
1.4.3 Teorías Complementarias.....	58
1.5 Teóricos.....	59
1.5.1 Teóricos Base	60
1.5.2 Teóricos Consolidadores	61
1.5.3 Teóricos Vanguardistas.....	62
1.6 Estudios Previos en Climas Cálidos Secos	64
1.6.1 Estudios Internacionales	65
1.6.2 Estudios Nacionales.....	66
1.6.3 Estudios Académicos	66

1.7 Estado de la Práctica	69
1.7.1 Proyectos Aplicados Panorama Internacional.....	73
1.7.2 Proyectos Aplicados Panorama Nacional	80
1.7.3 Casos de Estudio	87
1.8 Conceptualización de las Variables.....	90
1.8.1 Techo Verde.....	90
1.8.2 Reducción de Temperatura.....	94
1.9 Normatividad	96
1.9.1 Normativa Internacional	98
1.9.2 Normativa Nacional (México)	99
1.9.3 Normativa Regional y Local.....	100
Capítulo II.....	102
Metodología	102
Diseño Experimental para la Evaluación Térmica del Techo Verde en Clima Cálido Seco, Culiacán Rosales, Sinaloa.....	102
2.1 Enfoque y Diseño de la Investigación	103
2.2 Propuesta Metodológica.....	104
2.2.1 Diseño Experimental.....	104
2.2.2 Monitoreo Ambiental	105
2.2.3 Análisis Comparativo.....	106
2.3 Componentes Experimentales.....	107
2.4 Instrumentación y Procedimiento	108
2.5 Técnicas de Análisis.....	108
2.6 Justificación del Enfoque Cuasiexperimental.....	109
2.7 Justificación de Indicadores	110
2.7.1 Temperatura Superficial Interior del Techo de Concreto Armado	110
2.7.2 Temperatura Ambiente Interior	111
2.7.3 Humedad Relativa (RH) Interior	111
2.7.4 Radiación Solar Incidente	111
2.8 Diseño y Validación de Instrumentos	112
2.8.1 Criterios de Selección	113
2.8.2 Descripción de los Instrumentos	114

2.8.3 Validación	115
Capítulo III.....	117
Aspectos Contextuales	117
3.1 Demografía de Culiacán Rosales	117
3.2 El Clima de Culiacán Rosales Sinaloa.....	120
3.2.1 Temperaturas Extremas en la Ciudad de Culiacán Rosales	124
3.3 Características Constructivas de los Espacios Educativos en Sinaloa.....	126
3.3.1 Losas de Concreto Armado	127
3.4 Localización del Proyecto Cuasiexperimental.....	128
Capítulo IV.....	131
Análisis Descriptivo e Interpretativo del Techo Verde, la Reducción de Temperatura y Procedimiento e Instrumentación de Registros.....	131
4.1 Techo Verde.....	135
4.1.1 Soporte Base para el Techo Verde.....	137
4.1.2 Capas del Techo Verde	143
4.2 Reducción de Temperatura.....	152
4.2.1 Conductividad Térmica en Losas de Concreto Armado	153
4.2.2 Estrategias Pasivas para la Reducción de Temperatura en Losas de Concreto	155
4.2.3 Transferencia por Radiación	158
4.3 Procedimiento e Instrumentación para el Registro de Temperaturas.....	160
4.3.1 Condiciones Climáticas Durante el Periodo de Monitoreo.....	161
4.3.2 Disposición y Metodología de Monitoreo Térmico en los Espacios Evaluados.....	162
Capítulo V	166
Resultados Experimentales y Conclusiones.....	166
5.1 Criterio de Selección de Días Representativos	166
5.1.1 Día con Menor Temperatura Ambiental: 5 de abril de 2025.....	168
5.1.2 Día con Menor Temperatura Interior: 6 de abril de 2025	172
5.1.3 Día con Mayor Temperatura Ambiental: 15 de abril de 2025.....	176
5.1.4 Día con Mayor Temperatura Interior: 16 de abril de 2025	180
Conclusiones de los Días Analizados	184
Conclusiones comparativas de los días seleccionados.....	185

Conclusiones Generales	186
Cumplimiento de los Objetivos Específicos	187
1. Diseño y Construcción del Techo Verde Experimental.....	187
2. Comparación de Variables Térmicas y Ambientales.....	187
3. Contraste con Investigaciones Previas en Climas Cálidos	188
Comprobación de la Hipótesis	188
Implicaciones Ambientales y Arquitectónicas	189
Proyecciones y Recomendaciones	189
Evaluación Estacional.....	189
Análisis Energético Integral.....	190
Estudios de Replicabilidad.....	190
Riegos con Agua Reciclada	191
Conclusión General.....	191
Bibliografía	193
Anexo 1. Paleta vegetal implementada en el proyecto	201
Anexo 2. Información Concentrada de los Días Seleccionados para el Análisis	208
Anexo 3. Foto del Techo Verde 26 de noviembre 2025	210

Índice de Figuras

Figura 1 Jardines colgantes de Babilonia.....	6
Figura 2 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	7
Figura 3 Distribución de tipos de clima en la República Mexicana	25
Figura 4 Tipos de clima para Sinaloa.....	27
Figura 5 Clasificación de los techos verdes según la NADF-013-RNAT-2007.....	50
Figura 6 Techo verde extensivo	51
Figura 7 Techo verde semi-intensivo	52
Figura 8 Techo verde intensivo.....	53
Figura 9 Componentes básicos para una cubierta naturada	55
Figura 10 TV California Academy of Sciences, San Francisco, EE. UU.	75
Figura 11 ACROS, Fukuoka, Japón.....	76
Figura 12 Green roof art school in Singapore.....	77
Figura 13 Vancouver Convention Centre West.....	78
Figura 14 Chicago City Hall, Chicago, EE. UU.	79
Figura 15 La azotea más grande de América Latina, INFONAVIT CDMX.....	82
Figura 16 Algunos proyectos de techos verdes aplicados en México.....	83
Figura 17 Techo verde sala audiovisual 1 de la FIUADY	85
Figura 18 Techo verde UNACH	86
Figura 19 Ubicación de instrumentos registradores de temperaturas y humedad relativa	105
Figura 20 Registrador de datos analógico HOBO	113
Figura 21 Ubicación de caso de estudio en el contexto nacional	117
Figura 22 Delimitación del municipio de Culiacán	118
Figura 23 Climograma 1991-2020 Culiacán Rosales Sinaloa	120
Figura 24 Temperatura máxima y mínima en Culiacán	121
Figura 25 Temperatura promedio por hora en Culiacán	122
Figura 26 La mancha urbana de la ciudad de Culiacán, Rosales Sinaloa.....	124
Figura 27 Ubicación de Ciudad Universitaria CU - UAS.....	128
Figura 28 Ubicación de módulos en la Facultad de Arquitectura Culiacán.....	132
Figura 29 Ubicación del techo verde en el módulo 3 en la FAUAS	133

Figura 30	Inclinación del sol para el punto de referencia del área de análisis.....	135
Figura 31	Diagrama de la estructura del TV diseñado para la investigación	136
Figura 32	Corte estructural, módulos de la FAUAS	137
Figura 33	Corte de representativo de la losa (techo)	138
Figura 34	Vista en planta del espacio seleccionado para el techo verde.....	139
Figura 35	Representación gráfica corte sección de losa (techo) para el TV.	140
Figura 36	Espacio seleccionado para la construcción del proyecto.....	141
Figura 37	Limpieza y trazo en el techo, aula taller ocho	141
Figura 38	Se subió ladrillo de barro recocido	142
Figura 39	Proceso delimitación del espacio para el TV	143
Figura 40	Proceso de impermeabilización del espacio	144
Figura 41	Erupciones sobre el techo	144
Figura 42	Capa de cartón reciclado	145
Figura 43	Capas de plástico; polietileno natural (transparente) y negro	146
Figura 44	Colocación de botellas PET (Aplastadas)	147
Figura 45	Colocación de fieltro	148
Figura 46	Proceso para preparar el sustrato	149
Figura 47	Proceso de secado cascara de coco.....	150
Figura 48	Capa de cascara de coco	150
Figura 49	Diversidad de especies aptas para el TV experimental	151
Figura 50	Resultados de ensayo de la losa de concreto armado	153
Figura 51	Ubicación de sondas, en superficie interior de las losas	163
Figura 52	Colocación de sonda en parte inferior de las losas.....	164
Figura 53	Temperatura, humedad relativa ambiente y radiación solar 5 de abril.....	168
Figura 54	Temperatura superficial interior de losas y ambiental 5 de abril.....	169
Figura 55	Temperatura interior de espacios 05 de abril.....	170
Figura 56	Humedad relativa interior de espacios 05 de abril	171
Figura 57	Temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar 06 de abril.....	172
Figura 58	Temperatura superficial interior de losas 06 de abril	173
Figura 59	Temperatura interior de espacios 06 de abril.....	174
Figura 60	Humedad relativa 06 de abril 2025	175

Figura 61	Temperatura, humedad relativa y radiación solar del 15 de abril.....	176
Figura 62	Temperatura superficial interior en losas 15 de abril 2025	177
Figura 63	Temperatura interior de espacios 15 de abril 2025.....	178
Figura 64	Humedad relativa ambiente e interior de espacios 15 de abril 2025.....	179
Figura 65	Temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar 16 abril.....	180
Figura 66	Temperatura superficial interior de losas 16 de abril	181
Figura 67	Temperatura interior de espacios 16 de abril.....	182
Figura 68	Humedad relativa interior 16 de abril.....	183

Índice de Tablas

Tabla 1 Contribución de la investigación a los ODS	10
Tabla 2 Síntesis de beneficios y justificación de los techos verdes	17
Tabla 3 Grupos climáticos según Köppen	24
Tabla 4 Tipos de clima en México	26
Tabla 5 Algunas estrategias pasivas aplicadas en la arquitectura	32
Tabla 6 Aportes de autores sobre techos verdes.....	37
Tabla 7 Componentes para los sistemas de techos verdes	48
Tabla 8 Resumen comparativo de estudios previos	54
Tabla 9 Resumen de investigaciones en climas cálidos.....	68
Tabla 10 Estado de la Práctica en la Implementación de Techos Verdes.....	72
Tabla 11 Casos de estudio.....	89
Tabla 12 Metodología de la investigación	103
Tabla 13 Instrumentos de medición empleados	115
Tabla 14 Temperatura máxima promedio por mes en Culiacán.....	121
Tabla 15 Diversidad climática del municipio de Culiacán Sinaloa	123
Tabla 16 Eventos de temperaturas extremas en Culiacán Rosales, Sinaloa (2015–2024)	125
Tabla 17 Conductividad térmica de materiales usados en losas	154

Abreviaturas, Siglas y Acrónimos

°C	Grados Centígrados
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
BSh	Clima Cálido Semiseco
CO ₂	Dióxido de Carbono
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
FAUAS	Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Sinaloa
GEI	Gases de Efecto Invernadero
h	Hora
ICU	Isla de Calor Urbano
IMPLAN	Instituto Municipal de Planeación
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
IPCC	Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
NADF-013-RNAT-2017	Norma Ambiental para el Distrito Federal
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
RAE	Real Academia Española
RH	Humedad Relativa
SbN	Soluciones Basadas en la Naturaleza
SEDEMA	Secretaría del Medio Ambiente
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
STV	Sin Techo Verde
Tem	Temperatura
T. ^a	Temperatura Ambiente
TV	Techo Verde
UAS	Universidad Autónoma de Sinaloa
UNACH	Universidad Autónoma de Chiapas
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
W/m ²	Watts por metro cuadrado

Resumen

La presente investigación evalúa el desempeño térmico de un techo verde en edificaciones con techo de concreto armado ubicadas en Culiacán, Sinaloa, una región caracterizada por un clima cálido semiseco con altas temperaturas durante gran parte del año. El estudio tiene como objetivo analizar la reducción de temperatura interior generada por la implementación de un techo verde semi-intensivo. La metodología empleada combina un enfoque experimental y cuantitativo, complementado con observaciones cualitativas que permiten contextualizar los resultados. Se tomaron en cuenta dos módulos a escala real con losas de concreto armado, instrumentados con sensores de temperatura y humedad para el registro continuo de variables ambientales. Las mediciones se realizaron entre el 21 de marzo y 21 de abril del 2025, permitiendo establecer diferencias significativas en el comportamiento térmico de ambos espacios. Los resultados evidencian una reducción de temperatura interior hasta de 3.9 °C y hasta de 10.9 °C menos de temperatura superficial interior del techo, así como una mejora en la estabilidad térmica. Estas disminuciones se atribuyen principalmente a la capacidad de evapotranspiración de la vegetación y al aislamiento proporcionado por el sustrato. Asimismo, se identificó un potencial considerable de ahorro energético en climatización, reforzando la viabilidad de los techos verdes en contextos urbanos cálidos. Finalmente, el estudio aporta evidencia empírica que sustenta la incorporación de esta tecnología en normativas de construcción sustentable y planeación urbana, contribuyendo al desarrollo de estrategias arquitectónicas orientadas a la sustentabilidad.

Palabras clave: Techo verde, reducción de temperatura, clima cálido, infraestructura verde, arquitectura sustentable.

Abstract

This research evaluates the thermal performance of a green roof on buildings with reinforced concrete roofs located in Culiacán, Sinaloa, a region characterized by a warm, semi-dry climate with high temperatures throughout most of the year. The study aims to analyze the indoor temperature reduction generated by the implementation of a semi-intensive green roof. The methodology used combines an experimental and quantitative approach, complemented by qualitative observations that allow contextualizing the results. Two full-scale modules with reinforced concrete slabs were considered, instrumented with temperature and humidity sensors for the continuous recording of environmental variables. Measurements were taken between March 21 and April 21, 2025, revealing significant differences in the thermal behavior of both spaces. The results show a reduction in interior temperature of up to 3.9°C and a reduction in the interior surface temperature of the roof of up to 10.9°C, as well as an improvement in thermal stability. These decreases are primarily attributed to the evapotranspiration capacity of the vegetation and the insulation provided by the substrate. Furthermore, considerable potential for energy savings in air conditioning was identified, reinforcing the viability of green roofs in hot urban settings. Finally, the study provides empirical evidence supporting the incorporation of this technology into sustainable construction and urban planning regulations, contributing to the development of architectural strategies geared toward sustainability.

Keywords: Green roof, temperature reduction, warm weather, green infrastructure, sustainable architecture

Introducción

A nivel global, las actividades humanas han generado consecuencias ambientales de gran alcance, entre estas el calentamiento global (IPCC, 2021), la pérdida de ecosistemas y la contaminación del aire y del agua (*United Nations Environment Programme* [UNEP], 2023). La urbanización intensiva ha sustituido superficies naturales por concreto y asfalto, reduciendo la biodiversidad y la permeabilidad del suelo (Grimmond, 2007), lo que favorece la formación de islas de calor urbano (ICU) y eleva el riesgo de inundaciones (Santamouris, 2014). Frente a este panorama, la arquitectura contemporánea requiere incorporar estrategias sostenibles que contribuyan a mitigar estos efectos y a mejorar la habitabilidad de los espacios construidos (Santamouris, 2014).

Entre las soluciones basadas en la naturaleza, los techos verdes (Mihalakakou, Souliotis & Papadaki, 2023) se han consolidado como una alternativa eficaz. Su implementación en diferentes países responde a propósitos diversos: reducción de la temperatura interior; recuperación de espacios verdes; control de escorrentías; calidad ambiental; reducción de la demanda energética; mitigación del efecto ICU; retención de agua de lluvia; captura de CO₂ y fomento de la biodiversidad en entornos urbanos. Adicionalmente, los techos verdes ofrecen un valor social y estético al cambiar superficies grises con espacios verdes que contribuyen al bienestar de las personas.

El impacto de la radiación solar en los techos de concreto armado resulta especialmente crítico en regiones con clima cálido, ya que su alta inercia térmica favorece la absorción de calor y su transferencia al interior durante varias horas del día. Como respuesta, se recurre al uso de equipos de climatización, lo cual incrementa el

consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, con implicaciones ambientales, sociales y económicas.

En este contexto, la presente investigación se centra en analizar el techo verde (Minke, 2004) como estrategia de reducción de temperatura interior, particularmente en regiones con clima cálido, donde las temperaturas suelen superar los 36 °C en los meses de verano, considerando la transferencia de calor a través del techo como variable clave en el desempeño térmico del sistema.

La investigación se desarrolla a escala real (1:1) mediante la construcción de un techo verde experimental sobre una losa de concreto armado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS). Para su análisis se emplean sensores de registro de temperatura y humedad relativa en el interior del espacio, complementados con datos de radiación solar y condiciones ambientales obtenidos de la estación climatológica de la UAS. Con esta información se realizan comparaciones entre el comportamiento térmico de espacios con y sin techo verde, identificando diferencias de temperatura y humedad en distintas condiciones de radiación solar y temperatura ambiente.

En suma, la investigación busca aportar evidencia empírica sobre la efectividad de los techos verdes en climas cálidos como estrategia pasiva de adaptación al cambio climático. Con esto se pretende dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas y contribuir al cumplimiento de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), proponiendo alternativas viables para la construcción sustentable en contextos urbanos de alta vulnerabilidad térmica.

Planteamiento del Problema

En las últimas décadas el incremento de las temperaturas debido al calentamiento global, consecuencia de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ha generado diversos problemas ambientales. Los espacios destinados a las actividades humanas sufren los efectos de las elevadas temperaturas especialmente durante los períodos de verano en regiones con clima cálido. En estos contextos, la transferencia de calor ocurre principalmente en las azoteas expuestas a radiación solar directa, así como, a través de los muros dependiendo de su orientación; cuando las edificaciones están construidas con materiales y sistemas que permiten una alta ganancia térmica (IPCC,2021).

Las regiones con climas cálidos enfrentan retos significativos relacionados con la temperatura interior de las edificaciones. El aumento global de las temperaturas, combinado con el crecimiento urbano y la sustitución de áreas naturales por materiales impermeables como el concreto y el asfalto, contribuye al incremento de la temperatura y el efecto de isla de calor (ONU-Hábitat, 2020). En consecuencia, las edificaciones requieren del uso intensivo de sistemas de aire acondicionado para mantener condiciones interiores confortables, lo que genera un alto consumo energético, mayores costos en electricidad y más emisiones de GEI (IPCC,2021).

Este problema tiene implicaciones ambientales de gran alcance: incrementa la demanda de energía para la refrigeración, lo que contribuye al agotamiento de recursos naturales e intensifica el calentamiento global y la formación de islas de calor urbano. Abordar esta situación resulta indispensable para reducir los efectos negativos sin generar daños adicionales al ecosistema.

Antecedentes del Problema

El aumento de las temperaturas globales constituye una preocupación crítica que afecta a todas las regiones del mundo. El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) ha documentado un incremento constante de la temperatura promedio global debido a las emisiones de GEI, lo que ha intensificado el efecto de isla de calor en áreas urbanas y aumentado la demanda energética destinada al enfriamiento de edificaciones.

Diversos factores influyen en las variaciones de la temperatura media global y, por ende, en el cambio climático. Entre estos se incluyen el ascenso del nivel del mar, la interacción de las nubes con la radiación solar, la presencia de aerosoles en la atmósfera y el incremento en las emisiones de gases como el dióxido de carbono y el metano. También, son relevantes la variabilidad en la reflectividad terrestre, la pérdida de hielo en los polos, la concentración de vapor de agua, la cobertura nubosa y la cantidad de radiación solar que alcanza la superficie (IPCC, 2021).

En regiones cálidas, el crecimiento urbano agrava los problemas derivados del cambio climático: aumento de temperaturas, pérdida de biodiversidad, disminución de áreas verdes y reducción de la infiltración de agua al subsuelo. Estos efectos traen como consecuencia alteraciones ambientales de escala global que se reflejan en desastres naturales cada vez más intensos. Desde tiempos remotos, el clima ha condicionado las formas de vida, alimentación, vestimenta y, de manera fundamental, las tipologías arquitectónicas utilizadas para el refugio humano. La urbanización contemporánea, sin embargo, ha generado transformaciones drásticas en la estructura de las ciudades,

incrementando la vulnerabilidad ante los fenómenos climáticos extremos (ONU-Hábitat, 2020).

En este contexto, la construcción de un alto número de edificaciones en zonas urbanas responde a una alta demanda habitacional, pero muchas veces se priorizan sistemas constructivos rápidos y económicos, sin considerar criterios de confort térmico. Esto ha derivado en una deficiente protección contra la transferencia de calor en cubiertas, problemática especialmente aguda en regiones de clima cálido.

Según el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2020), las proyecciones de la temperatura para el estado de Sinaloa muestran, en todos los escenarios de cambio climático, un incremento gradual que oscila entre 1.0 a 1.4°C en el escenario más favorable y entre 1.2 a 4.6°C en el escenario más pesimista. Ante esta situación, el uso de infraestructuras verdes se ha convertido en un eje estratégico de las políticas internacionales para alcanzar los ODS. Los techos verdes destacan como una tecnología que contribuye al desarrollo urbano sustentable al mejorar las condiciones térmicas y ambientales (López et al, 2020).

Antecedentes de Techos Verdes

Los antecedentes históricos de los techos verdes se remontan a las primeras civilizaciones. En la antigua Mesopotamia, hacia el siglo XXI a.C., los zigurats ya incorporaban vegetación en terrazas escalonadas con fines simbólicos y funcionales. De igual modo, durante el siglo VI a.C. se construyeron los célebres jardines colgantes de Babilonia, véase Figura 1, considerados una de las Siete Maravillas del Mundo Antiguo, donde se utilizó vegetación en terrazas con un propósito estético (Medina, 2020). Aunque

no existe evidencia fidedigna de su existencia, se les reconoce como un referente temprano de integración de naturaleza y arquitectura.

Figura 1

Jardines colgantes de Babilonia



Nota. Reconstrucción imaginaria, imagen reproducida de Las 7 maravillas del mundo moderno y antiguo, Delmundo, 2024, (<https://www.delmundo.top/>). CC BY 2.0.

Medina (2020) explica que, a lo largo de la historia, las civilizaciones aprovecharon los recursos de su entorno para edificar viviendas capaces de protegerlas de las condiciones climáticas. Dichos asentamientos muestran la interacción entre técnicas constructivas, elementos naturales y las características topográficas y ambientales de cada región. Minke (2004) señala que los techos verdes tienen una larga historia tanto en regiones frías —Islandia, Escandinavia, Canadá y Estados Unidos— como en áreas cálidas como Tanzania, donde han cumplido funciones opuestas: conservar el calor en los primeros casos y proteger contra el calor en los segundos.

En particular, describe que el techo de pasto escandinavo se construía con una pendiente de 30 a 45 grados y una capa de aproximadamente 20 cm de césped asentada

sobre varias capas de corteza de abedul. Gracias al alto contenido de tanino, esta corteza era resistente a la descomposición y, al sellarse con alquitrán, formaba una barrera eficaz contra raíces y filtración de agua. En México, los techos verdes han cobrado relevancia a nivel normativo. En 2017, el Gobierno de la Ciudad de México presentó la norma ambiental NADF-013-RNAT-2017, que establece especificaciones técnicas para su instalación en edificaciones urbanas (Gaceta Oficial del Distrito Federal, 2017).

Techos Verdes y su Contribución a los ODS

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, aprobada en 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas, plantea 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como hoja de ruta para enfrentar los principales retos sociales, económicos y ambientales del siglo XXI (ONU, 2015), véase Figura 2.

Figura 2

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)



Nota. Imagen reproducida de Naciones Unidas (2015), (<https://acortar.link/gizRh0>). CC BY 2.0

Es de suma importancia considerar los objetivos y contribuir con información que apoye parte de lo planteado o bien hacer aporte a nuevas metas y objetivos que sean de alto impacto social, ecológico y económico para la sustentabilidad de las ciudades. Los ODS se deben trabajar de forma conjunta para garantizar el logro en cada uno, aun así, es

relevante enfatizar la importancia de retomar los que se apegan más a la presente investigación, Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento; Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura; Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles; y Objetivo 13: Acción por el clima.

ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento

El acceso al agua limpia y a su gestión eficiente es uno de los mayores desafíos en zonas urbanas expuestas al cambio climático. El informe de seguimiento de los ODS señala que, para 2030, será necesario aumentar significativamente la eficiencia en el uso del agua en todos los sectores, especialmente en aquellos vinculados al crecimiento urbano (Informe de Naciones Unidas, 2023, p. 26). En este sentido, los techos verdes ofrecen una alternativa que puede contribuir a ese objetivo, ya que su implementación permite captar agua de lluvia, reducir escorrentías y, en algunos casos, reutilizar aguas grises para el riego de vegetación adaptada al clima local.

ODS 9 Industria, Innovación e Infraestructura

El desarrollo de infraestructura sostenible, resiliente y eficiente es un componente clave para hacer frente al impacto ambiental de las ciudades. El informe de 2023 destaca que: “los avances en infraestructura resiliente y sostenible siguen siendo desiguales entre regiones y países, lo que limita el alcance de una transformación verdaderamente inclusiva.” (Informe de Naciones Unidas, 2023, p. 30). En este contexto, los techos verdes representan una solución innovadora para modernizar la infraestructura urbana sin generar mayores cargas estructurales o energéticas, integrando criterios de sostenibilidad, innovación constructiva y adaptación climática en el diseño de edificaciones.

ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles

La rápida urbanización representa uno de los principales retos para la sostenibilidad ambiental. Según el Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023, más de la mitad de la población mundial ya reside en zonas urbanas, y se proyecta que para el año 2050, esta cifra alcance el 70 % (Naciones Unidas, 2023, p. 36). Este crecimiento, si no se gestiona adecuadamente, puede agravar los problemas de infraestructura, contaminación, acceso a servicios y calidad del aire.

La incorporación de techos verdes en entornos urbanos aporta directamente a esta meta, ya que reduce la temperatura superficial de los edificios, mejora el microclima, disminuye el efecto de isla de calor urbana y contribuye a una mayor resiliencia ante eventos climáticos extremos. Además, mejora la calidad de vida en zonas vulnerables al calor excesivo, especialmente en regiones cálidas y secas.

ODS 13 Acción por el Clima

El ODS 13 enfatiza la urgencia de adoptar medidas para combatir el cambio climático y sus efectos, con especial atención a la reducción de emisiones y al fortalecimiento de capacidades de adaptación. El informe global señala que es necesario reducir de manera inmediata las emisiones de gases de efecto invernadero para evitar superar el umbral crítico de aumento de temperatura de 1.5 °C. Si se sobrepasa este punto de inflexión, la intensidad y frecuencia de los fenómenos extremos aumentará significativamente, reduciendo la efectividad de las estrategias de adaptación (Naciones Unidas, 2023, p. 40). En este contexto, los techos verdes se perfilan como soluciones pasivas y accesibles que disminuyen la demanda energética en climatización, contribuyen

al secuestro de carbono y mejoran la capacidad adaptativa de las edificaciones frente al calor extremo, lo cual resulta valioso en entornos urbanos con climas cálidos.

La implementación de techos verdes como estrategia pasiva para el mejoramiento térmico de edificaciones no solo responde a una necesidad técnica en zonas cálidas; también se alinea con compromisos globales en materia de sostenibilidad. A través de esta investigación, se contribuye de forma concreta a específicas de los ODS descritos. Este enfoque permite que los resultados de la tesis trasciendan de local y se integren en una visión más amplia del desarrollo responsable y adaptativo frente a los desafíos ambientales contemporáneos. En resumen, la contribución se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Contribución de la investigación a los ODS

ODS	Meta específica	Contribución del proyecto
ODS 6: Agua limpia y saneamiento	6.4 Para 2030, aumentar sustancialmente el uso eficiente del agua en todos los sectores.	El techo verde propuesto considera el uso de especies vegetales adaptadas al clima cálido seco, lo cual permite minimizar el consumo hídrico y potencialmente reutilizar aguas grises.
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	9.4 Modernizar la infraestructura para que sea sostenible y eficiente en el uso de recursos.	La tesis promueve soluciones constructivas innovadoras (techos verdes) que modernizan el diseño tradicional de cubiertas en zonas cálidas, con beneficios térmicos y ecológicos.
ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	11.6 Reducir el impacto ambiental negativo per cápita de las ciudades.	La implementación de techos verdes contribuye a mitigar la isla de calor urbano y a mejorar el confort térmico en viviendas, especialmente en zonas de alta vulnerabilidad climática.
ODS 12: Producción y consumo responsables	12.2 Lograr la gestión sostenible y el uso eficiente de los recursos naturales.	El proyecto apuesta por el uso racional de materiales, el reciclaje de residuos orgánicos en sustratos y la optimización del espacio urbano como superficie productiva.
ODS 13: Acción por el clima	13.1 Fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima.	La investigación aporta datos empíricos para justificar la inclusión de techos verdes como estrategia pasiva de adaptación ante el incremento de temperaturas en climas cálidos.

Nota. Adaptado de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible (ONU, 2015, 2023).

Justificación

La presente investigación surge ante la necesidad de incorporar estrategias constructivas que mitiguen los efectos térmicos extremos en regiones de clima cálido, particularmente en zonas urbanas donde el crecimiento poblacional y la densificación generan condiciones adversas para el confort interior. El análisis de los techos verdes como sistema pasivo para reducir la transferencia de calor hacia el interior de las edificaciones representa un enfoque pertinente dentro de la arquitectura sustentable y el diseño urbano resiliente.

Desde una perspectiva conceptual, los techos verdes no solo permiten mejorar el confort térmico, sino que aportan beneficios ambientales como la reducción del efecto de ICU (Santamouris, 2014), captación de agua pluvial, mejora en la calidad del aire y la disminución del consumo energético. La vegetación instalada sobre los techos actúa como una barrera térmica natural, que reduce la incidencia directa de radiación solar sobre las losas y mejora el comportamiento térmico de los espacios interiores (Minke, 2004; Oberndorfer et al., 2007).

En el plano geográfico, México presenta una gran diversidad climática, entre las regiones más afectadas por el incremento térmico, se encuentran aquellas con clima cálido seco. Culiacán Rosales en Sinaloa, donde se desarrolla este estudio, se enfrentan temperaturas que superan los 36 °C durante el verano (CONAGUA, 2023), lo que hace imprescindible buscar soluciones adaptadas a esta condición climática. La aplicación de techos verdes en esta zona puede representar una alternativa efectiva para moderar la temperatura interior, disminuir el uso de sistemas de enfriamiento mecánico y, con esto, reducir el consumo energético en cualquier tipo de edificación donde se implementen.

Desde la justificación temporal, el contexto global actual está marcado por el cambio climático y la necesidad de implementar soluciones sostenibles. La transformación de los entornos urbanos para hacerlos más resilientes; ha impulsado un renovado interés en las estrategias pasivas y en las infraestructuras basadas en la naturaleza. De acuerdo, con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2021), este tipo de infraestructuras pueden incidir en más del 70 % de las metas de la Agenda 2030, lo que refuerza la pertinencia del presente estudio. Además de su funcionalidad térmica, los techos verdes ofrecen beneficios múltiples que justifican su investigación y aplicación, algunos de estos son:

Salud y Bienestar

Las altas temperaturas afectan directamente la salud humana, particularmente durante eventos de calor extremo que han incrementado su frecuencia e intensidad debido al cambio climático. Un techo verde bien diseñado puede reducir el estrés térmico, mejorar la habitabilidad de los espacios interiores y contribuir al bienestar físico y psicológico de sus ocupantes (Sanyé-Mengual et al., 2015).

Más allá del confort térmico, los techos verdes contribuyen a la salud mental y bienestar psicológico mediante la biofilia, concepto que describe la conexión innata del ser humano con la naturaleza. Estudios de neurociencia ambiental han demostrado que la exposición visual a vegetación, incluso desde ventanas interiores, reduce los niveles de cortisol (hormona del estrés) en un 13-15% y mejora la recuperación post-estrés en tiempos 23% más rápidos comparado con vistas a superficies construidas convencionales (Ulrich et al., 1991; van den Berg et al., 2015). En contextos urbanos densos, donde el acceso a áreas verdes a nivel de suelo es limitado, los techos verdes representan una

estrategia viable para proporcionar estos beneficios biofílicos a poblaciones urbanas (Lee et al., 2015).

Adicionalmente, los techos verdes mejoran la calidad del aire interior al reducir la infiltración de contaminantes atmosféricos. La vegetación actúa como filtro biológico que captura material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y absorbe contaminantes gaseosos como óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂). Un estudio cuantitativo realizado en Chicago estimó que 1 m² de techo verde extensivo puede remover anualmente 0.2 kg de partículas atmosféricas y 0.04 kg de NO_x (Yang et al., 2008).

Sostenibilidad Ambiental

Al reintroducir vegetación en superficies construidas, se mejora la calidad del aire, se promueve la biodiversidad y se reduce el efecto de isla de calor urbano (Oke, 1982), lo que impacta positivamente en el entorno natural y en la percepción ambiental de las ciudades (Oberndorfer et al., 2007). La isla de calor urbano constituye uno de los fenómenos de alteración microclimática más documentados en ciudades contemporáneas, caracterizado por temperaturas del aire de 2-5°C superiores en zonas urbanas densas comparadas con áreas rurales circundantes (Oke, 1982). Este incremento térmico tiene efectos cascada que incluyen mayor consumo energético para enfriamiento.

Modelaciones urbanas realizadas en Toronto, Canadá, demostraron que, si el 50% de los techos disponibles en el área urbana se convirtieran a techos verdes, la temperatura promedio urbana durante olas de calor se reduciría en 0.5-2.0°C, con reducciones localizadas de hasta 4°C en distritos de alta densidad constructiva (Banting et al., 2005). Esta capacidad de enfriamiento a escala urbana tiene implicaciones directas en la resiliencia climática de las ciudades y en la reducción de mortalidad asociada a eventos

de calor extremo. Los beneficios en biodiversidad urbana constituyen otro aspecto crucial de la sostenibilidad ambiental de los techos verdes.

En términos de calidad del aire urbano, los techos verdes contribuyen mediante tres mecanismos principales: deposición seca de material particulado en superficies foliares, absorción de gases contaminantes a través de estomas, y reducción indirecta de emisiones al disminuir la demanda energética de edificaciones. Análisis de ciclo de vida comparativos han demostrado que un techo verde puede capturar entre 0.2-0.5 kg de material particulado por m² anualmente, lo que equivale a remover las emisiones producidas por un vehículo que recorre aproximadamente 1,200 km (Rowe, 2011; Yang et al., 2008).

Eficiencia Energética

Los techos verdes disminuyen la carga térmica sobre las edificaciones, lo que reduce la necesidad de sistemas de climatización artificial. Esto se traduce en un menor consumo energético, especialmente en regiones con alta demanda de refrigeración (Berardi et al., 2014). La eficiencia energética de edificaciones representa una prioridad global considerando que el sector edificado consume aproximadamente el 36% de la energía final global y genera cerca del 40% de las emisiones de CO₂ relacionadas con energía (International Energy Agency, 2019).

En climas cálidos, donde los sistemas de aire acondicionado pueden representar hasta el 60-70% del consumo energético total de una edificación residencial, las estrategias de enfriamiento pasivo como los techos verdes adquieren relevancia crítica (Pérez-Lombard et al., 2008).

Los ahorros energéticos documentados por techos verdes varían según clima, tipología de edificación y características del sistema de techo verde, pero consistentemente demuestran reducciones significativas en demanda de refrigeración. Un estudio experimental en Ottawa, Canadá, que monitoreó durante dos años un edificio con mitad del techo convencional y mitad con techo verde, reportó que la sección con techo verde redujo el flujo de calor a través de la cubierta en 95% durante el verano y en 26% durante el invierno, traducido en ahorros energéticos anuales de refrigeración del 75% (Liu & Baskaran, 2003).

Adaptación al Cambio Climático

La implementación de sistemas pasivos como los techos verdes permite aumentar la resiliencia urbana frente a fenómenos climáticos extremos. Su integración en viviendas urbanas ayuda a mitigar los impactos del calentamiento global y fortalece las capacidades locales de adaptación (ONU, 2015).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) proyecta incrementos en la frecuencia, intensidad y duración de eventos de calor extremo en la mayoría de las regiones habitadas del planeta, con incrementos de temperatura promedio global de 1.5-4.5°C para finales del siglo XXI según escenarios de emisiones (IPCC, 2021). Las áreas urbanas son particularmente vulnerables debido al efecto de isla de calor que amplifica las temperaturas extremas, resultando en riesgos incrementados para la salud pública, demanda energética, e infraestructura urbana.

Los techos verdes representan una estrategia de adaptación basada en ecosistemas que incrementa la resiliencia urbana mediante múltiples mecanismos. Durante eventos de calor extremo, funcionan como infraestructura de enfriamiento pasivo que mantiene

condiciones de habitabilidad interior incluso cuando los sistemas mecánicos fallan o resultan inaccesibles por cortes energéticos o costos operativos.

El concepto de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), promovido por organismos internacionales como la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), posiciona a los techos verdes como infraestructura verde prioritaria para adaptación urbana al cambio climático (Cohen-Shacham et al., 2016). A diferencia de infraestructura gris convencional, las SbN como los techos verdes proporcionan beneficios múltiples (térmicos, hidrológicos, ecológicos, sociales) y presentan mayor flexibilidad adaptativa ante incertidumbres climáticas futuras.

Beneficios Económicos

En México, la Norma Ambiental NADF-013-RNAT-2017 de la Ciudad de México establece incentivos fiscales —como el descuento del 10 % en el impuesto predial— para quienes integren techos verdes en sus edificaciones, siempre que se cumplan las especificaciones técnicas establecidas (SEDEMA, 2017). Asimismo, estos sistemas pueden prolongar la vida útil de los techos y aumentar el valor de las propiedades (Perini & Rosasco, 2013).

En conjunto, estas razones posicionan al techo verde como una estrategia de alto impacto en contextos urbanos cálidos. Su estudio en condiciones reales, como lo propone esta investigación en Culiacán, Rosales permite generar conocimiento aplicado que contribuya a promover prácticas sostenibles en el ámbito de la construcción, y al mismo tiempo, brindar soluciones concretas a problemáticas ambientales y sociales derivadas del cambio climático.

Además, su evaluación experimental aporta evidencia científica útil para la toma de decisiones en políticas públicas y normativas de construcción sustentable. Este tipo de investigaciones favorece la transición hacia modelos urbanos más resilientes, equitativos y compatibles con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU-Hábitat, 2020), fortaleciendo el compromiso institucional y académico con la mitigación de los efectos del cambio climático en el noroeste de México. Se hace una síntesis de los beneficios y justificación de los techos verdes, véase Tabla 2.

Tabla 2

Síntesis de beneficios y justificación de los techos verdes

Categoría	Aspectos Relevantes	Evidencia Científica / Datos Cuantitativos
Salud y Bienestar	<ul style="list-style-type: none"> • Reducen el estrés térmico en interiores. • Mejoran la habitabilidad durante olas de calor. • Promueven bienestar psicológico mediante efectos biofílicos. • Mejoran la calidad del aire interior. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción de cortisol en 13–15% por exposición visual a vegetación (Ulrich et al., 1991; van den Berg et al., 2015). • Recuperación post-estrés 23% más rápida con vistas a vegetación. • 1 m² de techo verde puede remover 0.2 kg de partículas y 0.04 kg de NOx por año (Yang et al., 2008).
Sostenibilidad Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> • Mitigan la isla de calor urbano. • Aumentan la biodiversidad. • Mejoran la calidad del aire exterior. • Contribuyen a la percepción ambiental positiva de la ciudad. 	<ul style="list-style-type: none"> • La UHI incrementa 2–5°C las temperaturas en zonas urbanas (Oke, 1982). • Convertir 50% de techos en Toronto reduciría 0.5–2°C la temperatura urbana (Banting et al., 2005). • Captura anual de 0.2–0.5 kg/m² de material particulado (Rowe, 2011).
Eficiencia Energética	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuyen la carga térmica en techos. • Reducen demanda de aire acondicionado. • Funcionan como estrategia de enfriamiento pasivo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción del flujo de calor 95% en verano y 26% en invierno (Ottawa; Liu & Baskaran, 2003). • Ahorros energéticos en refrigeración del 40–50% en climas cálidos (Texas; Sailor, 2008). • El sector edificado consume 36% de la energía global y genera 40% del CO₂ (IEA, 2019).
Adaptación al Cambio Climático	<ul style="list-style-type: none"> • Infraestructura pasiva que mantiene habitabilidad interior en calor extremo. • Incrementan la resiliencia urbana. • Consideradas soluciones basadas en la naturaleza (SbN). 	<ul style="list-style-type: none"> • Proyecciones IPCC: aumento global de temperatura de 1.5–4.5°C para finales de siglo (IPCC, 2021). • Los techos verdes funcionan incluso con fallas de infraestructura mecánica. • Reconocidos por IUCN y PNUMA como SbN prioritarias (Cohen-Shacham et al., 2016).
Beneficios Económicos	<ul style="list-style-type: none"> • Incentivos fiscales (CDMX). • Prolongan la vida útil de los techos. • Aumentan valor inmobiliario. 	<ul style="list-style-type: none"> • CDMX: descuento del 10% en impuesto predial con implementación certificada (SEDEMA, 2017). • Aumento del valor de la propiedad y reducción de costos de mantenimiento (Perini & Rosasco, 2013).
Relevancia para la Investigación	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de estudiar el desempeño térmico real en climas cálidos. • Contribuye a políticas públicas y normativas de construcción sustentable. • Favorece prácticas urbanas resilientes y alineadas con ODS. 	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluación experimental en Culiacán aporta conocimiento aplicado para zonas urbanas de clima cálido. • Relevante para ODS y para instituciones que buscan adaptación urbana al cambio climático (ONU-Hábitat, 2020).

Nota. Es de suma importancia conocer los beneficios que generan los techos verdes, generado un punto de partida para su implementación.

En función de los antecedentes expuestos y justificación planteada, se considera necesario orientar la investigación hacia la comprensión de la reducción de temperatura real que ofrecen los techos verdes en condiciones climáticas cálidas. Con base en ello, se formulan preguntas de investigación, hipótesis y objetivos, las cuales guían el desarrollo metodológico y cuasiexperimental del estudio, permitiendo establecer la relación entre las variables analizadas y los objetivos propuestos.

Preguntas de Investigación

Pregunta de Investigación Central

¿En qué medida la implementación de un techo verde contribuye a la reducción de temperatura interior de una edificación con losa de concreto armado que recibe radiación solar directa ubicada en región con clima cálido?

Preguntas Especificas

1.- ¿Cuáles son los criterios técnicos, diseño y constructivos necesarios para implementar un techo verde sobre una losa de concreto armado en una región con clima cálido?

2.- ¿Qué diferencias se presentan en los registros de temperatura superficial interior de las losas de concreto armado, así como en temperatura y humedad relativa del espacio interior entre los espacios sin y con techo verde?

3.- ¿Cuál es el resultado comparativo con otras investigaciones y metodologías aplicadas sobre techo verde en regiones con clima cálido?

Hipótesis de Investigación

La implementación de un techo verde sobre una losa de concreto armado constituye una estrategia pasiva que, en edificaciones ubicadas en región de clima cálido reduce de manera significativa la temperatura interior de los espacios, esto debido a su capacidad de aislamiento térmico ante la radiación solar directa y las elevadas temperaturas del entorno.

Objetivos***Objetivo General***

Medir y analizar el impacto de la implementación de un techo verde como estrategia pasiva para la reducción de la temperatura interior en una edificación con losa de concreto armado ubicada en una región de clima cálido, considerando la transferencia de calor a través del techo como variable clave en el desempeño térmico del sistema.

Objetivos Específicos

- 1.- Construir un techo verde sobre una losa de concreto armado, donde sea posible contar con otro espacio en condiciones semejantes, para usar de testigo en el registro de temperatura y humedad.
- 2.- Comparar temperatura superficial interior de las losas de concreto armado con y sin techo verde, así como la temperatura y humedad relativa del interior de los espacios.
- 3.- Analizar los resultados con investigaciones previas realizadas en regiones con clima cálido, a fin de identificar coincidencias y diferencias metodológicas.

Capítulo I

Marco Teórico Conceptual

El desarrollo de estrategias arquitectónicas sostenibles ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido a los impactos del cambio climático y la creciente urbanización, fenómenos que han intensificado problemas ambientales y de confort térmico en el mundo. Entre estos, el incremento de las temperaturas en entornos urbanos, asociado al efecto de isla de calor, representa uno de los principales retos para la habitabilidad de las edificaciones en climas cálidos. La necesidad de soluciones que reduzcan la demanda energética y promuevan condiciones de confort térmico ha impulsado la investigación de alternativas basadas en la naturaleza, los techos verdes han demostrado un potencial significativo (Oberndorfer et al., 2007; Berardi, 2016).

En este marco, el presente capítulo reúne los fundamentos teóricos, conceptuales y normativos que sustentan la investigación sobre la implementación de techos verdes como estrategia pasiva de mitigación térmica (Givoni, 1998; Olgyay, 2015; Santamouris, 2014). Se revisan antecedentes globales y regionales, aportaciones de teóricos y especialistas, así como, estudios que han evaluado experimentos de su desempeño en distintos contextos climáticos. Además, se consideran los lineamientos normativos y las perspectivas actuales que vinculan a los techos verdes con los (ODS), subrayando su importancia en la adaptación urbana al cambio climático.

La construcción de este marco teórico no solo permite identificar los principios físicos, ambientales y constructivos asociados a los techos verdes, también permite conocer los vacíos de conocimiento que justifican la presente investigación. Así, se

establece una base sólida para el análisis comparativo entre losas de concreto armado, con y sin techo verde en condiciones reales de clima cálido.

1.1 Cambio Climático

El cambio climático constituye uno de los principales retos ambientales del siglo XXI, con impactos directos sobre la sostenibilidad de los entornos urbanos, en especial en regiones de clima cálido. Se define como la alteración significativa y sostenida de los patrones climáticos, se atribuye tanto a causas naturales como, a las actividades humanas que han incrementado las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2021). Entre sus manifestaciones más relevantes se encuentran el aumento de la temperatura media global, mayor frecuencia de olas de calor, alteración de los regímenes de precipitación y el incremento del nivel del mar (Le Treut et al., 2007).

En contextos urbanos, estos efectos se ven intensificados por el fenómeno de la ICU, resultado de la sustitución de superficies naturales por materiales de alta inercia térmica como el concreto y el asfalto, que almacenan calor durante el día y lo liberan lentamente durante la noche (Oke, 1982). Este proceso eleva las temperaturas nocturnas, con consecuencias negativas en la salud pública, el consumo energético y la calidad de vida (Santamouris, 2014).

Diversos estudios coinciden en que la adaptación urbana al cambio climático debe incluir soluciones basadas en la naturaleza, como los techos verdes (Minke, 2004), que contribuyen a reducir la temperatura superficial, mejorar el confort térmico interior y mitigar los efectos del calentamiento urbano (Berardi, 2016; Susca et al., 2011). En este contexto, la incorporación de infraestructura verde no solo se plantea como una medida ambiental.

1.1.1 Calentamiento Urbano y el Fenómeno de Isla de Calor Urbano

La Isla de Calor Urbano (ICU) se refiere a la diferencia térmica entre áreas urbanizadas y sus zonas rurales adyacentes, producto de la densidad edificatoria, la escasa vegetación, la impermeabilización del suelo y el uso de materiales con elevada absorción térmica (Oke, 1987; Rizwan et al., 2008). Durante olas de calor, las ciudades densamente construidas pueden registrar temperaturas nocturnas hasta 7 °C más elevadas que las zonas no urbanizadas, lo que incrementa el riesgo de mortalidad por estrés térmico (Parsons, 2014; ISO, 2017), especialmente en poblaciones vulnerables (Santamouris, 2015).

En regiones de clima cálido, la ICU reduce la eficiencia térmica de las edificaciones y aumenta la demanda de climatización artificial, generando mayores consumos energéticos y emisiones de gases de efecto invernadero (Mirzaei & Haghghat, 2010). Diversos estudios han demostrado que la intensidad de la isla de calor está directamente relacionada con el grado de urbanización y la disminución de áreas verdes, factores que alteran el balance energético urbano (Santamouris, 2014; Stewart & Oke, 2012).

Por ello, la mitigación del calentamiento urbano requiere estrategias integrales de planificación y diseño, donde la infraestructura verde —como los techos y muros vegetales, corredores bioclimáticos y pavimentos permeables— actúe como regulador térmico y ecológico. Estas acciones se enmarcan en las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN), que representan una alternativa eficaz y sostenible para contrarrestar los efectos del calentamiento urbano, lo que da paso al siguiente apartado.

1.1.2 Soluciones Basadas en la Naturaleza como Respuesta Climática

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) se han consolidado como una alternativa eficaz para afrontar los efectos del cambio climático. Según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza UICN (2020), consisten en acciones que protegen, gestionan o restauran ecosistemas naturales o modificados, con el propósito de atender desafíos sociales, climáticos y ambientales, generando beneficios tanto para la biodiversidad como para el bienestar humano.

En contextos urbanos, las SbN incluyen techos verdes, muros vegetales, corredores biológicos y pavimentos permeables, entre otras estrategias. Estas intervenciones reducen la intensidad de la ICU, mejoran la eficiencia energética, filtran contaminantes y capturan carbono (Kabisch et al., 2017). Dentro de este grupo, los techos verdes destacan por su efectividad en la regulación térmica, ya que funcionan como una capa de aislamiento que limita la transferencia de calor hacia el interior de los edificios (Ascione et al., 2013).

La implementación de techos verdes no solo responde a necesidades ambientales, sino también sociales y funcionales, al generar espacios más resilientes, habitables y estéticamente integrados. En regiones con clima cálido, estas soluciones adquieren una importancia estratégica, pues contribuyen de manera directa a la adaptación climática, a la reducción del consumo energético en sistemas de climatización artificial y a la mejora del confort térmico urbano.

En este contexto, resulta fundamental analizar las condiciones climáticas específicas de cada región para orientar la aplicación de estas estrategias y evaluar su impacto térmico en edificaciones reales, lo que da paso al siguiente apartado.

1.2 El Clima

El clima de una región depende de su ubicación geográfica y de variables como la temperatura, la humedad, la precipitación y el viento, todos factores que inciden directamente en la percepción del confort térmico. Uno de los sistemas más difundidos para clasificar climas es el de Köppen–Geiger, desarrollado originalmente por el climatólogo alemán Wladimir Köppen y posteriormente actualizado por Rudolf Geiger.

Este método, formulado con fines científicos y educativos, tenía como propósito relacionar la distribución de la vegetación natural con los patrones climáticos del planeta, de modo que fuera posible describir los diferentes tipos de clima a partir de criterios objetivos y comparables a escala global (Peel et al., 2007; Kottek et al., 2006).

En la actualidad, su uso continúa vigente como herramienta de referencia en estudios ambientales, urbanos y arquitectónicos. Este sistema distingue cinco grupos principales de climas, véase Tabla 3.

Tabla 3

Grupos climáticos según Köppen

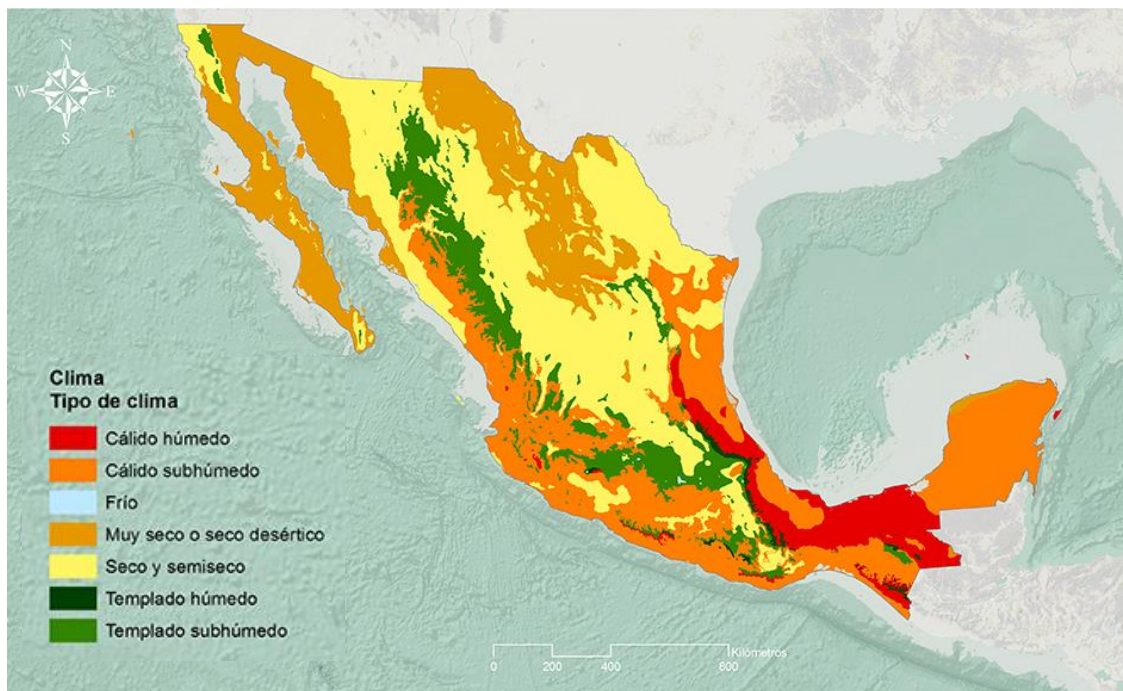
Letra	Grupo Climático	Características Principales
A	Tropical	Altas temperaturas todo el año; lluvias abundantes
B	Seco	Precipitaciones escasas; incluye desiertos y estepas
C	Templado	Invierno suave; veranos cálidos
D	Continental	Invierno frío y verano cálido; gran amplitud térmica anual
E	Polar	Temperaturas muy bajas todo el año; sin verano real

Nota. Elaboración propia a partir de Köppen (1936) y Gobierno de Navarra (2015). Recuperado de <https://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>

Los grupos climáticos se consideran a nivel global, pero, son el punto de partida para identificar los tipos de clima que se tienen a nivel nacional y regional, primero, el panorama nacional cuenta con 7 tipos de climas catalogados como: cálido húmedo, cálido subhúmedo, frío, muy seco o seco desértico, seco semiseco, templado húmedo y templado subhúmedo, la representación gráfica muestra que en la mayor parte del territorio predominan el clima; cálido subhúmedo; cálido seco y semiseco; muy seco o seco desértico, véase Figura 3.

Figura 3

Distribución de tipos de clima en la República Mexicana



Nota. Adaptado de Climas, Atlas Digital Geográfico, 2015, <https://acortar.link/5fPBkn>

Para la presente investigación se retoma una región con clima cálido seco y semiseco, en la zona noroeste de México dentro del estado de Sinaloa donde también se tiene otros climas, los cuales se representan más adelante.

Según información obtenida de la página web de SEMARNAT del total de km² del territorio Nacional, el 32.02% corresponde a clima cálido seco y semiseco, el 28.87% es cálido subhúmedo y el 21.90 tiene un clima muy seco o seco desértico, véase Tabla 4, esto significa que las temperaturas en esas zonas son muy elevadas.

Tabla 4

Tipos de clima en México

Climas		
Nombre	Superficie total (km ²)	Porcentaje (%)
Cálido húmedo	134,930.82	6.94
Cálido subhúmedo	561,125.87	28.87
Frío	658.58	0.03
Muy seco o seco desértico	409,948.43	21.09
Seco y semiseco	622,528.36	32.02
Templado húmedo	13,382.49	0.69
Templado subhúmedo	201,313	10.36
Superficie Total	1,943,887	

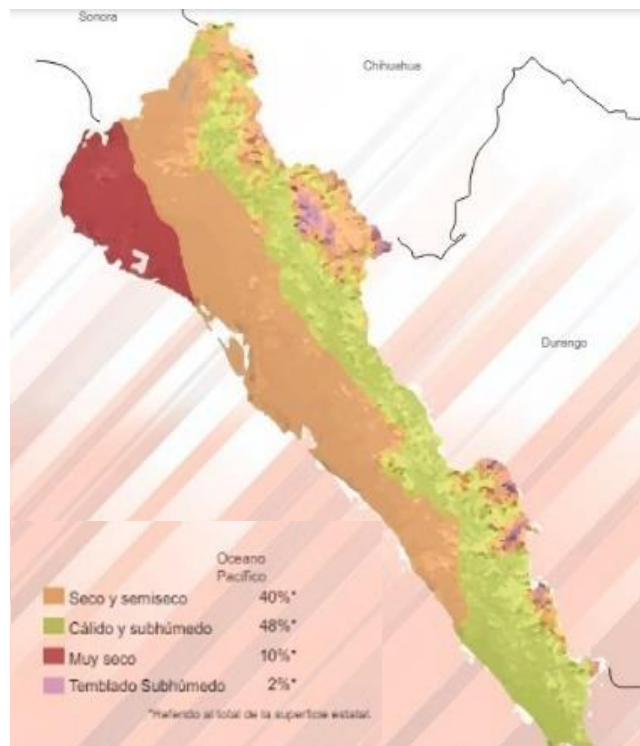
Nota. Porcentaje de tipos de climas en la República Mexicana. Fuente: Atlas Digital Geográfico, 2015

Según la información de la clasificación climática el Grupo B: Climas Secos, se caracterizan por la escasez de precipitaciones y alta evaporación. Se subdividen en: BS: Clima semiárido o estepario, con precipitaciones moderadas; BW: Clima árido o desértico, con precipitaciones muy bajas. En regiones con clima cálido, especialmente en las clasificaciones Aw (sabana con estación seca en invierno), Am (monzónico) y BSh/BWh (estepario o desértico cálido), las temperaturas elevadas y la exposición solar intensa generan una alta transferencia de calor hacia el interior de las edificaciones, especialmente a través del techo.

En el ámbito estatal se cuenta con variedad climática debido a que se tiene: costa, valle y sierra, Sinaloa cuenta con cuatro tipos de clima: seco y semiseco en un 40%, cálido y subhúmedo en un 48%, muy seco en un 10% y templado subhúmedo en solo un 2%, véase Figura 4.

Figura 4

Tipos de clima para Sinaloa



Nota. Adaptada del libro, Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de Sinaloa (p 9), por Pro-Aire Sinaloa 2018-2027, 2017, SEMARNAT.

Es importante señalar que el crecimiento urbano de la ciudad de Culiacán Rosales se desarrolla en una región con clima cálido semiseco (BSh), según la clasificación de Köppen modificada por García (2004). Estas condiciones se caracterizan por temperaturas elevadas durante la mayor parte del año, con valores medios mensuales que superan los rangos de confort térmico establecidos para espacios habitables, especialmente entre los meses de abril y octubre (CONAGUA, 2020; INEGI, 2020).

1.2.1 Sistemas Pasivos de Acondicionamiento Térmico en Arquitectura

La arquitectura ha empleado históricamente estrategias de diseño que aprovechan los recursos naturales disponibles para proporcionar condiciones de habitabilidad adecuadas. Estas aproximaciones, denominadas sistemas pasivos, se fundamentan en la manipulación consciente de las variables climáticas mediante decisiones arquitectónicas que no requieren aporte energético externo para su funcionamiento (Givoni, 1994). A diferencia de los sistemas activos, que dependen de equipos mecánicos y consumo energético convencional, los sistemas pasivos integran soluciones arquitectónicas que operan mediante principios físicos naturales de transferencia de calor, aprovechamiento de la radiación solar, y dinámica de fluidos (Lechner, 2014).

La relevancia contemporánea de estos sistemas se ha incrementado exponencialmente ante la crisis climática global y la necesidad imperante de reducir el consumo energético en edificaciones. Según datos de la Agencia Internacional de Energía, el sector de la construcción representa aproximadamente el 36% del consumo energético mundial y cerca del 40% de las emisiones de CO₂ relacionadas con energía (International Energy Agency, 2019). En este contexto, la incorporación de estrategias pasivas de acondicionamiento térmico constituye una respuesta técnica y ética fundamental para la práctica arquitectónica del siglo XXI.

Fundamentos Termodinámicos de los Sistemas Pasivos. El comportamiento térmico de una edificación está regido por los principios fundamentales de la termodinámica, particularmente por los mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación (Incropera et al., 2011). Los sistemas pasivos operan mediante la modulación estratégica de estos mecanismos a través del diseño

arquitectónico. La conducción térmica, definida por la Ley de Fourier, describe el flujo de calor a través de materiales sólidos y es directamente proporcional al gradiente de temperatura y al coeficiente de conductividad térmica del material (Bergman et al., 2011). En el diseño de envolventes arquitectónicas, la selección de materiales con baja conductividad térmica y alta capacidad calorífica permite retardar el flujo de calor hacia el interior de los espacios habitables, principio fundamental de la inercia térmica (Aste et al., 2009).

La convección, por su parte, describe la transferencia de calor mediante el movimiento de fluidos, fenómeno que en arquitectura se manifiesta principalmente a través del aire. La ventilación natural aprovecha las diferencias de presión generadas por gradientes térmicos (efecto chimenea) o por acción del viento para promover la renovación del aire interior y la disipación de cargas térmicas (Allocca et al., 2003). Finalmente, la radiación térmica, que no requiere medio material para su transmisión, representa un mecanismo crítico tanto para la ganancia solar no deseada en climas cálidos como para las pérdidas térmicas nocturnas mediante radiación de onda larga hacia la bóveda celeste (Santamouris et al., 2001).

Clasificación de Estrategias Pasivas. Las estrategias de diseño pasivo pueden clasificarse según su función primaria en el balance térmico de la edificación. Olgyay (2015), propone una taxonomía basada en las necesidades climáticas específicas: estrategias de ganancia térmica para climas fríos, estrategias de conservación térmica para climas templados, y estrategias de disipación térmica para climas cálidos. Esta clasificación ha sido posteriormente refinada por diversos autores para incorporar

consideraciones sobre ventilación, iluminación natural y control de humedad (Givoni, 1998; Serra y Coch, 2005).

En climas cálidos, particularmente en regiones de clima cálido seco como el que caracteriza gran parte del territorio mexicano, las estrategias prioritarias se orientan hacia la minimización de ganancias térmicas y la maximización de pérdidas térmicas (González, 1986). Esto se logra mediante un conjunto integrado de decisiones de diseño que incluyen la orientación estratégica de la edificación para minimizar la exposición a la radiación solar directa durante las horas de mayor incidencia, el empleo de dispositivos de sombreado fijos o móviles que modulen la radiación sin obstruir la iluminación natural, y la incorporación de masa térmica que retarde y amortigüe las fluctuaciones térmicas diarias (Roaf et al., 2014).

Inercia Térmica y Capacidad de Almacenamiento. La inercia térmica, propiedad de los materiales de construcción para almacenar y liberar calor de manera retardada, representa uno de los principios pasivos más efectivos en climas con amplitud térmica diaria significativa (Aste et al., 2009). Materiales con alta densidad y capacidad calorífica específica, como el concreto, la mampostería de piedra o adobe, actúan como volantes térmicos que amortiguan las fluctuaciones de temperatura exterior, desfasando y atenuando los picos térmicos (Givoni, 1998). Este desfase temporal, que puede alcanzar 8-12 horas dependiendo del grosor y propiedades del material, permite que los máximos térmicos interiores ocurran durante horas de menor ocupación o coincidan con períodos de temperaturas exteriores más favorables.

La efectividad de la inercia térmica está condicionada por la capacidad de descargar el calor acumulado, típicamente mediante ventilación nocturna (Balaras, 1996).

Sin esta descarga térmica, la masa del edificio se satura progresivamente, perdiendo su capacidad de modulación térmica. La investigación de Givoni (1994) demostró que la combinación de masa térmica con ventilación nocturna puede reducir las temperaturas interiores máximas en 3-5°C respecto a construcciones ligeras sin estrategias pasivas.

Dentro las estrategias pasivas se tiene el uso de la vegetación para reducir la transferencia de calor a través de los techos, como se menciona a continuación.

Envolventes Vegetales como Sistema Pasivo Integrado. Las envolventes vegetales, particularmente los sistemas de techos verdes representan una estrategia pasiva que integra múltiples mecanismos de control térmico simultáneamente. La cubierta vegetal o techo verde proporciona sombreado que reduce la radiación solar directa sobre la superficie del techo, la vegetación y el sustrato incrementan la inercia térmica del sistema de cubierta, la evapotranspiración de las plantas genera enfriamiento evaporativo, y la capa de aire atrapada en el sustrato proporciona aislamiento térmico adicional (Sailor, 2008). Esta sinergia de mecanismos resulta en un desempeño térmico superior al que se lograría mediante la aplicación individual de cada estrategia.

Investigaciones en diversas zonas climáticas han documentado reducciones en las temperaturas superficiales de cubiertas vegetadas con lo que se logra una reducción en el consumo energético variable entre el 10-40% respecto a cubiertas convencionales expuestas, con impactos consecuentes en la reducción del flujo de calor hacia el interior de la edificación y en la mitigación del efecto de isla de calor urbano (Castleton et al., 2010; Santamouris, 2014). La efectividad específica de los techos verdes como estrategia pasiva en climas cálidos secos constituye el objeto central de la presente investigación y será analizada en detalle en secciones subsecuentes.

A continuación, se presenta un resumen de algunas estrategias pasivas aplicadas en las edificaciones, véase Tabla 5.

Tabla 5

Algunas estrategias pasivas aplicadas en la arquitectura

Estrategia Pasiva	Principio de Funcionamiento	Aplicación Arquitectónica	Reducción Térmica Potencial	Consideraciones para Clima Cálido Seco	Referencias
Control Solar Pasivo	Interceptación de radiación solar antes de alcanzar superficies	Aleros, voladizos, parteluces, celosías, pérgolas	60-80% reducción en ganancia solar directa	Prioritario en fachadas este-oeste; dimensionamiento según ángulo solar de verano (20-30°)	Lechner (2014); Olgay (2015)
Orientación Estratégica	Minimización de exposición a radiación solar en horas críticas	Eje longitudinal este-oeste; fachadas principales norte-sur	15-25% reducción en carga térmica	Crítico: evitar fachadas oeste sin protección; aprovechar vientos dominantes	Givoni (1998); Mazria (1979)
Inercia Térmica	Almacenamiento de calor en masa constructiva con desfase temporal	Muros de alta densidad (concreto, adobe, piedra) >20cm espesor	3-5°C reducción en temperatura máxima interior	Requiere ventilación nocturna para descarga térmica; efectivo con amplitud térmica >10°C	Givoni (1994); Aste et al. (2009)
Ventilación Natural Cruzada	Movimiento de aire por diferencial de presión (viento)	Aberturas opuestas; área de entrada 80% del área de salida	2-4°C reducción por renovación	Efectivo cuando temp. exterior < temp. interior; orientar según vientos dominantes	Allocca et al. (2003); Chen (2009)
Ventilación por Efecto Chimenea	Movimiento de aire ascendente por diferencial térmico	Torres de viento, chimeneas solares, atrios verticales	1,5-3°C reducción adicional	Requiere altura mínima 3m; ventilación nocturna más efectiva	Givoni (1991); Fathy (1986)
Techos Verdes Extensivos	Sombreado + evapotranspiración + aislamiento + inercia	Sustrato 5-15cm, vegetación de bajo mantenimiento (Sedum, nativas)	10-17 °C reducción temperatura superficial; 30-50% reducción flujo térmico	Requiere impermeabilización robusta; considerar carga estructural	Sailor (2008); Castleton et al. (2010)
Muros Verdes / Fachadas Vegetadas	Sombreado de envolvente vertical + evapotranspiración	Trepadoras en estructura, sistemas modulares hidropónicos	3-8°C reducción temperatura de muro	Efectivo en fachadas este-oeste; requiere riego en clima seco	Alexandri & Jones (2008); Pérez et al. (2011)
Dobles Piel / Fachadas Ventiladas	Cámara de aire ventilada disipa calor antes de alcanzar muro	Cámara 10-20cm entre piel exterior e interior	20-40% reducción carga térmica en fachada	Efectivo en fachadas oeste; ventilación continua necesaria	Saelens et al. (2008)
Protección con Vegetación de Sombra	Intercepción de radiación + evapotranspiración en perímetro	Árboles caducifolios en fachadas este-oeste; distancia 3-5m	1-3°C reducción temperatura del aire exterior inmediato	Especies nativas adaptadas; considerar ciclo estacional	Akbari et al. (2001)

Nota. Las estrategias aplicadas en la arquitectura van a depender del tipo de edificación, materiales usados en la construcción, orientación, facilidades económicas y cuestiones estéticas que se quieren lograr.

1.2.2 Transferencia de Calor en Techos de Concreto Armado (Expuestos)

En regiones con clima cálido seco, como Culiacán, los techos de concreto armado de los edificios constituyen las superficies más expuestas a la radiación solar directa, lo que incrementa de manera significativa la temperatura interior a través del fenómeno físico de la transferencia de calor. Este proceso ocurre principalmente por tres mecanismos: conducción, convección y radiación (Incropera et al., 2007).

En los techos convencionales de concreto, la elevada inercia térmica del material favorece la absorción de energía solar durante el día, la cual se transfiere al interior del edificio con un desfase temporal de varias horas, generando incomodidad térmica incluso durante la noche (Ascione et al., 2013). La magnitud de la ganancia térmica depende de factores como la intensidad de la radiación solar, las propiedades del material de la cubierta, la ventilación natural del espacio y la presencia o ausencia de aislamiento térmico.

Diversos estudios en climas cálidos han documentado que las superficies de losas de concreto expuestas pueden alcanzar temperaturas superiores a los 50 °C en verano, lo cual intensifica la carga térmica interior y aumenta la dependencia de sistemas de climatización mecánica (Santamouris, 2014). Esta acumulación térmica, especialmente en techos de concreto armado, suele provocar condiciones interiores que rebasan ampliamente los umbrales de confort térmico. Por esta razón, resulta indispensable comprender los criterios de confort aplicables a climas cálido-secos, los cuales constituyen la base para evaluar la efectividad de soluciones pasivas, como los techos verdes, en la moderación de ambientes interiores.

1.2.3 Consideraciones Sobre Confort Térmico en Clima Cálido Seco

El confort térmico se entiende como una condición subjetiva que expresa el grado de satisfacción de los ocupantes respecto al ambiente térmico de un espacio (ASHRAE, 2017). En regiones de clima cálido seco, este aspecto adquiere especial relevancia debido a la combinación de altas temperaturas diurnas, baja humedad relativa y elevada radiación solar que caracterizan al entorno urbano, lo que afecta de manera directa la habitabilidad de las edificaciones sin aislamiento adecuado.

De acuerdo con la norma ASHRAE 55-2017, los parámetros que determinan el confort incluyen tanto factores ambientales (temperatura del aire, temperatura radiante media, humedad relativa y velocidad del aire) como personales (actividad metabólica y vestimenta). Mientras que los modelos estáticos establecen rangos fijos de confort, en contextos áridos se recomienda el modelo adaptativo, que reconoce la capacidad de los ocupantes para ajustarse térmicamente a variaciones ambientales, particularmente en edificios naturalmente ventilados (de Dear & Brager, 2002).

En este sentido, investigaciones recientes en zonas con características similares a las de Culiacán han estimado que el rango de confort térmico en edificaciones sin climatización mecánica se sitúa entre 22.9 °C y 28.3 °C, con humedad relativa entre 30 % y 60 % (Ramírez-Dolores et al., 2022). Superar estos límites afecta el bienestar térmico de los ocupantes y aumenta la necesidad de recurrir a soluciones mecánicas de enfriamiento, lo que eleva el consumo energético.

Por ello, evaluar el desempeño de estrategias pasivas como los techos verdes implica analizar su capacidad para mantener el ambiente interior dentro de los rangos de confort establecidos, especialmente en las horas de mayor carga térmica. Esta relación

entre la transferencia de calor en techos de concreto armado expuestos y el confort interior resulta clave para valorar la viabilidad de los techos verdes como soluciones basadas en la naturaleza en regiones urbanas con clima cálido seco.

En consecuencia, el problema central radica en conocer el impacto y la efectividad de los techos verdes para reducir la transferencia de calor en edificaciones localizadas en climas cálidos de México. La presente investigación se enfoca en este aspecto, considerando tanto la clasificación y componentes de los techos verdes como los beneficios comprobados en estudios previos. El siguiente apartado presentará un estado del arte con énfasis en investigaciones experimentales y simulaciones aplicadas a regiones áridas y cálidas, que aporten evidencia empírica relevante para este trabajo.

1.2.4 Techo Verde: lo que Plantean Algunos Autores

El techo verde se ha consolidado como una de las estrategias constructivas más eficaces dentro del diseño arquitectónico sustentable, al integrar vegetación viva sobre la superficie de una edificación con el propósito de mejorar su desempeño térmico, energético y ambiental. Su origen contemporáneo se asocia al movimiento ecológico europeo de mediados del siglo XX, aunque existen antecedentes en las cubiertas ajardinadas de Escandinavia y Mesopotamia (Minke, 2004). En la actualidad, los techos verdes se consideran infraestructuras basadas en la naturaleza capaces de restablecer parcialmente los equilibrios perdidos por la urbanización (Oberndorfer et al., 2007).

Desde una perspectiva constructiva, un techo verde es un sistema compuesto por capas especializadas: una membrana impermeable que protege la estructura, una capa de drenaje, un filtro, un sustrato de crecimiento y una cubierta vegetal adaptado al clima local (FLL, 2018). Su correcto funcionamiento depende de la selección adecuada de

materiales y especies vegetales, las cuales deben responder a las condiciones térmicas, pluviométricas y estructurales del sitio. Según Peck et al. (1999), la aplicación de techos verdes no sólo mejora el aislamiento térmico del edificio, sino que también contribuye a reducir la escorrentía pluvial y aumentar la durabilidad de la impermeabilización al protegerla de la radiación solar directa.

La literatura especializada distingue tres tipos principales de techos verdes: extensivos, semi-intensivos e intensivos, clasificados según el espesor del sustrato, la carga estructural y el mantenimiento requerido. Los sistemas extensivos son ligeros y de bajo mantenimiento; los intensivos permiten vegetación arbustiva o incluso arbórea y pueden funcionar como espacios recreativos; mientras que los semi-intensivos combinan características intermedias (Peck et al., 1999; FLL, 2018). Esta clasificación permite seleccionar el tipo más adecuado de acuerdo con las condiciones estructurales de la edificación y los objetivos ambientales del proyecto.

Diversos autores han demostrado los beneficios térmicos de los techos verdes en regiones cálidas. Sailor (2008) y Santamouris (2014) reportan reducciones de temperatura superficial de entre 15 °C y 25 °C respecto a cubiertas convencionales, lo que contribuye a disminuir la transferencia de calor al interior del inmueble. Además, Berardi (2016) destaca su papel en la mitigación del efecto de isla de calor urbano y en la mejora del microclima local. Estos efectos positivos también se traducen en ahorros energéticos y en el incremento del confort térmico de los ocupantes (Ascione et al., 2013). De esta manera, el techo verde deja de ser un simple elemento paisajístico para convertirse en una solución técnica integral frente al cambio climático y al deterioro de la calidad ambiental urbana.

Finalmente, Minke (2004) subraya que el éxito de los techos verdes depende de su correcta integración arquitectónica y del uso de vegetación nativa, capaz de resistir periodos de sequía y altas temperaturas. En el contexto de climas cálidos secos, como el de Culiacán Rosales, su aplicación representa una estrategia pasiva de adaptación que combina conocimiento constructivo, ecológico y social. En síntesis, la revisión conceptual demuestra que los techos verdes constituyen un sistema que aporta beneficios térmicos, ambientales y urbanos ampliamente documentados. Para cerrar el apartado y dar paso al Estado del Arte, en la Tabla 6 se concentran algunos aportes.

Tabla 6*Aportes de autores sobre techos verdes*

Tema	Aportes Relevantes	Autores
Definición y origen	<ul style="list-style-type: none"> Estrategia constructiva sustentable basada en integrar vegetación viva sobre techos. Origen contemporáneo en Europa; antecedentes en Escandinavia y Mesopotamia. <ul style="list-style-type: none"> Considerados infraestructuras basadas en la naturaleza. 	Minke (2004); Oberndorfer et al. (2007)
Composición del sistema	<ul style="list-style-type: none"> Conformado por capas especializadas: membrana impermeable, drenaje, filtro, sustrato y vegetación. El desempeño depende de elegir materiales y especies adecuadas al clima y estructura. <ul style="list-style-type: none"> Mejora del aislamiento térmico. 	FLL (2018); Peck et al. (1999)
Funciones principales	<ul style="list-style-type: none"> Reducción de la escorrentía pluvial. Aumento de la durabilidad de impermeabilización al protegerla del sol. <ul style="list-style-type: none"> Extensivos: sustrato delgado, bajo peso y bajo mantenimiento. 	Peck et al. (1999)
Tipos de techos verdes	<ul style="list-style-type: none"> Semi-intensivos: características intermedias. Intensivos: sustratos profundos, permiten arbustos/árboles, uso recreativo. 	Peck et al. (1999); FLL (2018)
Beneficios térmicos	<ul style="list-style-type: none"> Reducciones de temperatura superficial de 15–25 °C frente a techos convencionales. Contribuyen al confort térmico interior. 	Sailor (2008); Santamouris (2014); Ascione et al. (2013)
Impactos ambientales urbanos	<ul style="list-style-type: none"> Mitigan la isla de calor urbano. Mejoran el microclima local. 	Berardi (2016)
Contribución energética	<ul style="list-style-type: none"> Disminuyen la transferencia de calor hacia el interior. Generan ahorros en aire acondicionado. 	Ascione et al. (2013); Sailor (2008)
Criterios de diseño e implementación	<ul style="list-style-type: none"> Éxito depende de integración arquitectónica adecuada. Uso de vegetación nativa tolerante a sequía y temperaturas extremas. 	Minke (2004)
Necesidad de estudios en climas cálidos secos	<ul style="list-style-type: none"> La mayoría de las investigaciones provienen de climas templados o húmedos. Se requieren estudios en zonas cálidas secas por diferencias en comportamiento térmico. 	(síntesis del apartado)

1.3 Estado del Arte

La evidencia científica sobre techos verdes se ha consolidado en las últimas dos décadas, mostrando beneficios térmicos, hidrológicos y ambientales, especialmente relevantes en climas cálidos y secos. Las revisiones fundacionales subrayan que el desempeño depende de la vegetación, el sustrato (espesor y humedad) y el diseño del sistema (drenaje y riego), además de las condiciones climáticas locales (radiación, viento y humedad). Estos trabajos establecen que los techos verdes reducen la carga térmica, moderan el microclima y aportan servicios ecosistémicos urbanos (p. ej., mitigación de isla de calor, biodiversidad y calidad del aire. (Oberndorfer et al., 2007; Berardi, 2016; Santamouris, 2014).

El proceso de investigación experimental consolida los componentes para los techos verdes, lo ideal radica en que el sustrato y la vegetación deben ser de la región, debido a que en el caso de la vegetación no tendría problemas de adaptación en cuestión de clima, teniendo como beneficio que tampoco se altera el ecosistema inmediato. A continuación, se presenta información de algunos estudios de los últimos años, donde se reiteran especificaciones que se deben tomar en cuenta para la implementación de techos verdes en edificaciones en región con clima cálido.

1.3.1 Comportamiento de los Techos Verdes en Climas Cálidos Secos

En los climas áridos y semiáridos, caracterizados por una elevada radiación solar, baja humedad relativa y amplias variaciones térmicas diurnas, los techos verdes se han consolidado como una estrategia pasiva de mitigación térmica eficaz. La literatura especializada coincide en que estos sistemas permiten reducir la temperatura superficial e interior de las edificaciones, mejorar el confort térmico y disminuir el consumo

energético destinado a climatización, especialmente cuando se seleccionan especies vegetales resistentes a la sequía y se optimizan las condiciones de riego y drenaje.

En Argelia (suroeste, clima cálido-seco), Fezzioui y Benaichata (2021) realizaron simulaciones mediante el programa TRNSYS para comparar techos verdes y techos convencionales. Los resultados mostraron que las cubiertas vegetadas reducen las horas de incomodidad térmica y el consumo energético para refrigeración, con descensos máximos de 5 °C en la temperatura superficial. Los autores destacan que la composición del sustrato y el control hídrico influyen directamente en la transferencia de calor, confirmando la pertinencia del diseño adaptado al contexto árido.

En México, Baja California, región semiárida, López Silva (2025) desarrolló una tesis de maestría en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) donde comparó el comportamiento térmico de techos verdes extensivos utilizando especies con distintos metabolismos fotosintéticos: *Salicornia pacifica* (C3) y *Sedum acre* (CAM). Los resultados experimentales evidenciaron reducciones de hasta 12 °C en la superficie y 9 °C en el interior en las celdas cubiertas con especies CAM, además de un menor requerimiento hídrico. Esto confirma que las características fisiológicas de las plantas en particular la evapotranspiración nocturna de las especies CAM inciden directamente en la eficiencia térmica y en la moderación del flujo de calor hacia el interior.

Por su parte, en Torreón, Coahuila, región con clima árido-semiárido, Quiroa-Herrera et al. (2021) realizaron un estudio experimental a escala de vivienda social instrumentado con sensores HOBO. Se registraron mejoras térmicas interiores y una disminución significativa de la ganancia de calor por la losa, al incorporar una cubierta

verde con vegetación nativa y sustratos económicos. El estudio demostró que la adaptación de los techos verdes a las condiciones locales puede lograr un desempeño térmico equivalente al de materiales aislantes convencionales, con un costo considerablemente menor.

De igual manera, Cuevas Acuña et al. (2024), en un experimento desarrollado en Zacatecas, México, validaron un prototipo de techo verde en clima cálido seco, obteniendo una reducción promedio de 4.03 °C en la temperatura interior y una mejora en el tiempo de confort térmico diario. Los autores subrayan la importancia de la composición multicapa del sistema y del balance hídrico del sustrato como variables determinantes en la transferencia de calor.

Estos resultados, junto con las simulaciones energéticas realizadas por diversos autores en zonas cálidas de México, confirman que el comportamiento térmico de los techos verdes depende de la interacción entre el tipo de vegetación, el sustrato, la profundidad del sistema y el nivel de humedad disponible. En su conjunto, los estudios revisados ratifican la eficacia de los techos verdes como solución pasiva de adaptación al cambio climático urbano, capaces de reducir la temperatura interior, mejorar el confort térmico y prolongar la vida útil de las cubiertas.

El análisis del comportamiento de los techos verdes en climas cálidos secos demuestra que su efectividad térmica no depende exclusivamente de su instalación, sino de la sinergia entre componentes físicos y biológicos. Por ello, resulta fundamental comprender los parámetros de desempeño térmico y, particularmente, el rol de la vegetación en la disipación del calor y el control de la temperatura. En el siguiente apartado Parámetros de Desempeño Térmico y Rol de la Vegetación se profundiza en los

factores que determinan la transferencia de calor en cubiertas naturadas, abordando las variables físicas, estructurales y biológicas que explican su comportamiento térmico.

1.3.2 Parámetros, Desempeño Térmico y Rol de la Vegetación

El desempeño térmico de los techos verdes en climas cálidos secos depende de la interacción de factores físicos, biológicos e hídricos, los cuales regulan la transferencia de calor entre el ambiente exterior y el espacio interior. La comprensión de estos parámetros permite explicar por qué las cubiertas vegetadas son eficaces como estrategias pasivas de mitigación térmica y cómo su diseño puede optimizarse en función de las condiciones climáticas.

Espesor y Propiedades del Sustrato. El sustrato constituye la base térmica del sistema. Su espesor, composición y contenido de humedad determinan la magnitud de la conducción térmica y el retardo del calor hacia el interior del edificio. En climas cálidos secos, un sustrato con mayor capacidad térmica o humedad retenida contribuye a amortiguar las variaciones diurnas.

Estudios experimentales y de simulación demuestran que un sustrato de entre 10 y 15 cm puede reducir significativamente la ganancia térmica en ambientes áridos (Sadeghian et al., 2021). Estos autores identificaron que el incremento del espesor del sustrato genera un efecto de desfase térmico, retrasando el momento de máxima temperatura interior, lo que mejora el confort térmico durante las horas más cálidas.

Humedad y Control de Riego. La humedad del sustrato es un parámetro esencial, pues al mantenerse dentro de un rango óptimo permite la evaporación y transpiración de la vegetación, procesos que disipan energía en forma de calor latente.

Cuando el sustrato se seca, se interrumpe este mecanismo y la superficie vegetal pierde eficacia térmica.

Por ello, varios autores recomiendan el uso de sistemas de riego automatizados o programables que garanticen la humedad mínima requerida sin generar consumo excesivo de agua (Andrić, Kamal & Al-Ghamdi, 2020). En zonas áridas, el balance hídrico entre evaporación y retención en el sustrato se convierte en un factor crítico para mantener la eficiencia térmica del sistema.

Tipo y Densidad de Vegetación. La vegetación representa el componente activo del techo verde, responsable de la intercepción de radiación solar y de la transpiración regulada que contribuye al enfriamiento. El índice de área foliar (LAI) y la cobertura vegetal determinan la cantidad de radiación absorbida o reflejada, así como la capacidad de disipar calor.

En un experimento en México, Cuevas Acuña et al. (2024) demostraron que un techo verde con cobertura vegetal adaptada al clima cálido seco redujo la temperatura interior en promedio 4.03 °C, además de incrementar el tiempo dentro del rango de confort térmico. El estudio evidenció que la vegetación con alta densidad foliar y adecuada humedad favorece un mayor retardo térmico y una menor amplitud de la onda de calor.

Propiedades Térmicas del Conjunto Multicapa. Además de la vegetación y el sustrato, el sistema constructivo del techo verde incluye capas drenantes, geotextiles e impermeabilizantes que influyen en la resistencia térmica total. El uso de materiales con baja conductividad térmica entre la losa y el sustrato mejora la eficiencia global del sistema, reduciendo la transferencia de calor por conducción.

Andrić et al. (2020) comprobaron que, en climas extremadamente cálidos, como el de Qatar, los techos verdes pueden complementar eficazmente los sistemas de aislamiento tradicionales, logrando reducciones de temperatura y consumo energético en edificaciones residenciales, aunque su desempeño depende de la disponibilidad de agua y de la selección de especies tolerantes al calor.

Factor de Decremento y Tiempo de Retardo. El factor de decremento expresa la proporción de la amplitud térmica que atraviesa el techo hacia el interior: valores menores indican mejor capacidad de amortiguamiento. El tiempo de retardo o *time lag* señala el desfase entre el pico de temperatura exterior y el pico interior; un retardo mayor significa que el calor tarda más en transmitirse al interior, reduciendo su impacto.

En el estudio experimental de Cuevas Acuña et al. (2024), el techo verde presentó un retardo de 4.86 h, frente a 1.16 h del techo convencional, con un factor de decremento de 0.55, lo que confirma su eficacia como barrera térmica natural.

Evidencia Experimental de Desempeño Térmico. En un estudio representativo realizado en Córdoba, Argentina, Imhof et al. (2021) compararon dos módulos experimentales, uno con techo verde y otro con techo convencional, bajo condiciones semiáridas. Durante seis meses de monitoreo, la vivienda con techo verde mantuvo temperaturas interiores 5–6 °C inferiores a la del módulo de control. Los autores atribuyen este comportamiento al efecto combinado del sustrato húmedo y la evapotranspiración vegetal, que reducen la conducción térmica y estabilizan las temperaturas nocturnas.

En Síntesis, la Relación con las Variables de Estudio. En la variable Techo verde, estos parámetros permiten identificar los componentes físicos (capas, sustrato,

vegetación y riego) que determinan su eficiencia térmica. En la variable Transferencia de calor, explican los mecanismos físicos; conducción, convección y radiación, que se ven mitigados por el efecto combinado del sustrato húmedo y la vegetación viva. El análisis conjunto evidencia que el desempeño térmico de los techos verdes depende de la interacción dinámica entre sus componentes constructivos y biológicos, más que de un solo factor aislado.

1.3.3 Hidrología y Control Pluvial

Según Parra Montoya, Rivera y Sánchez Montaña (2020), además de su función térmica, los techos verdes desempeñan un papel esencial en la gestión del agua pluvial urbana, al interceptar, retener y retrasar el escurrimiento superficial. Este comportamiento hidrológico depende de la estructura multicapa del sistema, el tipo de vegetación y las propiedades físicas del sustrato, especialmente su porosidad y capacidad de campo.

Investigaciones en contextos áridos y semiáridos han confirmado que los techos verdes contribuyen significativamente a la reducción del volumen y caudal pico de escorrentía. Mentens, Raes y Hermy (2006) documentaron reducciones promedio de 50 a 60 % en escurrimiento anual, mientras que Berndtsson (2010) consolidó la evidencia de que las eficiencias dependen del espesor del sustrato, la pendiente de la cubierta y las condiciones de saturación previas. En climas semiáridos, Stovin et al. (2013) observaron que la respuesta hidrológica se ve afectada por la distribución temporal de las lluvias, ya que los eventos cortos y de baja intensidad se retienen casi por completo, mientras que los episodios de lluvia intensa superan la capacidad de retención.

En el contexto latinoamericano, el manejo pluvial urbano enfrenta retos de impermeabilización excesiva y escasez de sistemas de infiltración natural. Los techos

verdes ofrecen una alternativa descentralizada de control pluvial sustentable, que puede integrarse con otras estrategias de infraestructura verde como pavimentos permeables o jardines de lluvia (Villarreal & Bengtsson, 2005). Su implementación en zonas cálidas secas, además, puede reducir la carga sobre sistemas de drenaje y favorecer la recuperación de humedad ambiental, contribuyendo indirectamente al balance térmico urbano.

En síntesis, los techos verdes funcionan como microcuencas urbanas, capaces de regular tanto los flujos de agua como los flujos térmicos. Su eficiencia hidrológica está estrechamente vinculada a la vegetación empleada y al manejo hídrico del sustrato, lo que reafirma la necesidad de un diseño integral que considere simultáneamente los aspectos térmicos y pluviales de estas cubiertas, una de las capas se encarga del drenado ante el exceso de agua por lo cual se controla eficazmente el escurrimiento.

1.3.4 Consideraciones Estructurales

El diseño de techos verdes requiere una consideración cuidadosa de las condiciones estructurales de la edificación, ya que estos sistemas introducen cargas muertas adicionales y variaciones dinámicas por humedad que afectan directamente la capacidad portante de la losa y los elementos de soporte (Sánchez et al., 2022). Dichas cargas dependen del tipo de cubierta (extensiva o intensiva), del espesor del sustrato, del contenido de humedad y del peso de la vegetación.

De acuerdo con las Directrices FLL (2018), ampliamente adoptadas a nivel internacional, los techos extensivos presentan un peso promedio entre 60 y 150 kg/m², mientras que los intensivos pueden alcanzar entre 300 y 500 kg/m², considerando el estado saturado. Estas guías enfatizan la importancia de evaluar la capacidad estructural

bajo condiciones de máxima retención de agua, así como la resistencia a la succión del viento y la estabilidad del sistema frente a movimientos diferenciales del sustrato.

El estudio de Getter y Rowe (2006), uno de los referentes experimentales en Norteamérica, documenta que el incremento de peso en condiciones de saturación puede elevarse hasta un 40 % respecto al peso seco, lo que justifica incluir coeficientes de seguridad adicionales en el diseño estructural. Estos autores señalan que el comportamiento estructural de la cubierta no solo depende de la carga vertical uniforme, sino también de las variaciones localizadas derivadas del drenaje y de la acumulación de agua en zonas deprimidas o con vegetación densa.

En investigaciones europeas, Villarreal y Bengtsson (2005) observaron que los techos verdes actúan como sistemas de almacenamiento temporal de agua pluvial, reteniendo entre el 50 % y el 80 % del volumen precipitado según la intensidad de la lluvia. Este fenómeno incrementa la carga transitoria en lapsos cortos, lo que debe considerarse en el cálculo de esfuerzos instantáneos y flexión máxima de las losas. En climas cálidos secos, donde las lluvias son escasas, pero de gran intensidad, estas cargas súbitas pueden ser estructuralmente más críticas que las permanentes.

En el contexto mexicano, la Norma Ambiental NADF-013-RNAT-2017, publicada en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, establece parámetros mínimos de diseño para sistemas de naturación de azoteas el cual se aborda en el subapartado 1.3.7 Clasificación de los Techos Verdes. Incluye criterios de verificación estructural, pendientes máximas, protección contra raíces, y resistencia a cargas saturadas, retomando lineamientos adaptados a las condiciones climáticas nacionales.

En síntesis, la implementación de techos verdes debe abordarse bajo un enfoque multidisciplinario que vincule el diseño estructural con el térmico e hidrológico. Las variables techo verde y transferencia de calor se relacionan aquí con la capacidad del sistema constructivo para soportar peso adicional sin comprometer la integridad estructural, manteniendo su desempeño térmico y de gestión pluvial. Incorporar estos criterios desde la fase de proyecto asegura durabilidad, seguridad y eficiencia en el funcionamiento integral de las cubiertas vegetadas.

1.3.5 Estándares y Guías en México

Para el contexto nacional, La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México (SEDEMA, 2017). Indica las especificaciones técnicas y ambientales para los sistemas de naturación de azoteas, definiendo los componentes mínimos requeridos para garantizar su funcionamiento adecuado, así como los criterios de seguridad estructural, impermeabilización, drenaje y selección vegetal. Esta norma promueve el uso de especies nativas o adaptadas a las condiciones locales, con el fin de reducir el consumo de agua y facilitar el mantenimiento

Además, la norma fija parámetros de diseño como el espesor mínimo del sustrato, la capacidad de carga de la losa, la disposición de capas drenantes y retenedoras, y la incorporación de barreras antirraíces y sistemas de riego eficientes. También establece lineamientos sobre el manejo y monitoreo posterior a la instalación, considerando aspectos de seguridad laboral y acceso a las cubiertas.

Aunque fue elaborada para el ámbito de la Ciudad de México, la NADF-013-RNAT-2017 se ha convertido en el marco de referencia técnica y administrativa más difundido en el país, adoptado por diversas universidades, municipios y entidades

federativas para la regulación o incentivo de techos verdes en edificaciones públicas y privadas. Su aplicación resulta esencial como base metodológica y comparativa para investigaciones sobre desempeño térmico, como la que se desarrolla en esta tesis.

1.3.6 Componentes para los Sistemas de Techos Verdes

En concordancia con los estudios clásicos y contemporáneos sobre techos verdes, diversos autores han identificado los componentes esenciales que determinan su eficiencia térmica, hidráulica y biológica. Cada capa que integra el sistema cumple una función específica que incide en su comportamiento global, desde la cobertura vegetal y el sustrato hasta los sistemas de drenaje y los elementos constructivos complementarios.

La Tabla 7 sintetiza los principales hallazgos reportados por Informes de la Construcción (2008) respecto al desempeño comparativo de distintos materiales y especies vegetales utilizados en techos verdes, lo que permite entender cómo las decisiones de diseño influyen en la regulación térmica y en la gestión del agua dentro de estos sistemas.

Tabla 7

Componentes para los sistemas de techos verdes

Vegetación
<p><i>Sedum</i>: destaca por su alta resistencia a la sequía, aunque presenta limitada capacidad de cobertura. <i>Aptenia</i>: ofrece un notable poder tapizante, pero muestra baja resistencia a las heladas. <i>Cotoneaster horizontalis</i> y <i>Lonicera nitida</i>: obtuvieron el mejor desempeño general entre las especies evaluadas.</p>
Sustrato
<p>Mezcla de corteza de pino con 10 % de lodos compostados: favorece un crecimiento vegetal más vigoroso. Picón y arcilla expandida: proporcionan mayor resistencia frente a malas hierbas. Arcilla expandida: contribuye a temperaturas más bajas y mejor aislamiento térmico. Sustratos con gel: evidencian el comportamiento menos favorable.</p>
Drenaje y elementos retenedores de agua
<p>Placas sintéticas: buena capacidad de evacuación de agua, aunque retienen poco ($\approx 6 \text{ l/m}^2$). Lana de roca cohesionada: combina adecuada evacuación y retención ($\approx 20 \text{ l/m}^2$). Sistema aljibe: sobresale por su elevada capacidad de retención ($\approx 80\text{--}160 \text{ l/m}^2$). Gel: mostró un desempeño deficiente.</p>
Otros componentes constructivos:
<p>Aislamiento térmico: permite reducir el consumo de energía, con diferencias mínimas entre los sistemas analizados.</p>

Nota. Elaboración propia a partir de los datos presentados en *Informes de la Construcción* (2008)

La información presentada en la Tabla 4 evidencia que la elección adecuada de vegetación, sustrato y sistema de drenaje es determinante para optimizar el desempeño térmico de un techo verde, lo cual se relaciona directamente con el objetivo general de esta investigación: evaluar la reducción de temperatura interior mediante estrategias pasivas. La selección de especies como *Cotoneaster horizontalis* o *Lonicera nitida*, que muestran un comportamiento superior, sugiere que una mayor cobertura vegetal y resistencia climática pueden potenciar la capacidad de sombreado y evapotranspiración, contribuyendo a disminuir la transferencia de calor hacia la losa.

Asimismo, los sustratos con propiedades térmicas favorables —como la arcilla expandida— demuestran un mejor aislamiento, lo que respalda los Objetivos Específicos 1 y 2, al influir directamente en la temperatura superficial interior de la losa comparada con una cubierta convencional. De manera similar, la incorporación de sistemas de drenaje con alta retención de agua, como el modelo aljibe, favorece la estabilidad térmica del sistema debido a la inercia térmica asociada al contenido hídrico, lo que resulta relevante para comprender los mecanismos de reducción de calor durante el análisis comparativo con otros estudios en climas cálidos (Objetivo Específico 3). En conjunto, estos elementos permiten identificar qué configuraciones de techo verde son más prometedoras para maximizar el desempeño térmico en edificaciones de clima cálido como la estudiada.

1.3.7 Clasificación de los Techos Verdes

Los techos verdes se diferencian principalmente por el espesor del sustrato, el tipo de vegetación que soportan, los requerimientos de mantenimiento y la carga estructural que ejercen sobre la losa. La Norma Ambiental NADF-013-RNAT-2007, publicada en la

Gaceta Oficial del entonces Distrito Federal, establece tres categorías básicas; extensivo, semi-intensivo e intensivo, para su diseño e implementación (Gobierno del Distrito Federal, 2007). Esta clasificación, sintetizada, véase Figura 5, proporciona criterios de diseño que permiten seleccionar el tipo de techo verde en función de las condiciones estructurales de la edificación.

Figura 5

Clasificación de los techos verdes según la NADF-013-RNAT-2007

Tipo de naturación	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Altura de crecimiento de plantas	5 -50 cm	5 - 100 cm	5 -400 cm
Diámetro de copa	No aplica	No aplica	300 cm máximo
Substrato	10 - 15 cm	15 -30 cm	> 40 cm
Carga adicional	110 - 140 kg/m ²	250 kg/ m ²	> 250 kg/ m ²
Cobertura vegetal	Crasuláceas	Crasuláceas, pastos y arbustos	Crasuláceas, pastos, arbustos y árboles

Nota. Retomada de GODF, Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007.

Se aborda cada una de las clasificaciones de los techos verdes con la finalidad de comprender las particularidades y los aspectos a tomar en cuenta al integrar en las edificaciones, especialmente la carga adicional que se estaría adicionando a la estructura donde se implementa un techo verde, así como los tipos de vegetación idóneas según la región climática. Ahora bien, a continuación, se genera una descripción cada uno los tres tipos de techos verdes considerados en la Norma Ambiental para el Distrito Federal.

Techo Verde Extensivo. Este tipo de cubierta se caracteriza por su bajo requerimiento de mantenimiento y su frecuente instalación en áreas de acceso limitado. Normalmente se emplean especies vegetales de escasa demanda hídrica, capaces de desarrollarse con un sustrato de apenas 5 a 15 cm y de subsistir principalmente con agua de lluvia. La vegetación suele ser de porte bajo, conformada por especies endémicas o bien adaptadas a las condiciones ambientales, lo que reduce al mínimo las labores de

conservación. Su peso aproximado varía entre 60 y 140 kg/m² (Stovin et al., 2007). Por estas características, es una opción idónea para edificaciones existentes, pues exige refuerzos estructurales mínimos para soportar la carga adicional véase Figura 6.

Figura 6

Techo verde extensivo



Nota. Imagen de referencia, fuente: Retomada de *greenroofs*, <https://acortar.link/0P18ia>

Techo Verde Semi-intensivo. Se ubica en un nivel intermedio entre los sistemas intensivos y extensivos. El sustrato presenta un espesor aproximado de 12 a 30 cm, lo que restringe en parte la variedad de especies vegetales que pueden emplearse, aunque ofrece mayor diversidad que los extensivos. Requiere mantenimiento periódico si se colocan arbustos, cabe destacar que es necesario el uso vegetación regional para reducir la cantidad de agua que podría requerir una planta que no está adaptada, este tipo de techo verde genera peso estructural se estima entre 120 y 250 kg/m² (Rowe, 2011), véase Figura 7.

Figura 7*Techo verde semi-intensivo*

Nota. Imagen de referencia, retomada de Climate.asla, Centro Juvenil Gary, 2019, <https://acortar.link/RktJxE>

Techo Verde Intensivo. Se asemeja a un jardín convencional, ya que permite el acceso y admite una amplia diversidad vegetal, incluyendo especies comestibles, arbustos e incluso árboles, según Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007 considera que podrían colocarse árboles que lleguen a tener un crecimiento hasta de cuatro metros y/o una copa de tres metros. Este tipo de cubierta requiere un sustrato de más de 30 cm de espesor va a depender el tipo de vegetación que se tenga contemplado colocar, su ejecución y mantenimiento implican mayores costos, pues necesitan riego regular, fertilización y podas frecuentes. De acuerdo con Minke (2004), es aconsejable su implementación principalmente en edificaciones de nueva construcción, ya que demanda un cálculo estructural detallado y soporta un peso que puede variar aproximadamente entre 250 y 400 kg/m², véase Figura 8.

Figura 8

Techo verde intensivo



Nota. Imagen de referencia, manipulada de Forbes, El nuevo parque Salesforce de San Francisco es Prime Real Estate, 2018, <https://acortar.link/a3YO7a>

1.3.7 Resumen Comparativo de Estudios Previos

El análisis comparativo de estudios previos permite comprender la evolución de las estrategias pasivas aplicadas a la mitigación térmica en edificaciones localizadas en climas cálidos y secos, particularmente a través del uso de techos verdes (TV). Estos estudios, desarrollados en contextos internacionales, nacionales y regionales, aportan evidencia sobre el desempeño térmico, energético y estructural de las cubiertas naturadas bajo diferentes condiciones ambientales. Además, ofrecen una perspectiva integral que abarca desde la selección de especies vegetales y sustratos, hasta los aspectos normativos y de mantenimiento, contribuyendo así a fortalecer los lineamientos de diseño adaptativo en zonas áridas y semiáridas (González-Méndez et al., 2022).

La revisión evidencia cómo el enfoque experimental y la simulación numérica se han consolidado como metodologías clave para evaluar el impacto de los TV sobre la transferencia de calor, la eficiencia hídrica y el confort térmico, véase Tabla 8.

Tabla 8

Resumen comparativo de estudios previos

Autor(es) y año	Tipo de estudio	Lugar / Clima	Resultados clave
Quiroa-Herrera et al. (2021)	Experimental (vivienda social)	Torreón / árido–semiárido	Reducción de ganancia térmica de la losa e interiores; pertinencia de especies nativas y sustratos de bajo costo.
Fezzioui & Benaichata (2021)	Estudio técnico/simulación	Argelia / cálido-seco	Reducciones térmicas y energéticas con riego eficiente; condiciones de implementación.
Zaina et al. (2022)	Artículo científico	Qatar / árido cálido	Recomendaciones de diseño y riego inteligente para techos y muros verdes.
López Silva (2020)	Tesis de maestría	Ensenada / semiárido	Especies CAM reducen hasta 12 °C superficial y 9 °C interior; menor riego.
Salas (2024)	Artículo técnico (simulación)	Mexicali / cálido-seco	Reducción interior y ahorro energético en vivienda social con techo verde.
Álvarez Narváez et al. (2023)	Artículo científico (simulación)	México / seco	Reducción térmica en regiones secas con EnergyPlus/OpenStudio; lineamientos de diseño.
Pianella et al. (2023)	Experimental (verano–invierno)	Mediterráneo cálido	El rasgo de la planta (densidad/arquitectura/estrategia hídrica) modula la transferencia de calor.
Berndtsson (2010); Stovin et al. (2013)	Revisiones y experimental	Varios	Retención/atenuación de escorrentía; sensibilidad a sustrato, vegetación y humedad.
Contreras-Bejarano et al. (2023)	Análisis estructural	Latinoamérica	Rigidez equivalente requerida aumenta 11–58 % para cargas de 100–300 kg/m ² .
NADF-013-RNAT-2017	Norma técnica	CDMX	Especificaciones para naturación de azoteas: componentes, vegetación nativa, mantenimiento y seguridad.

Nota. Tabla generada con información consultada en diferentes fuentes y autores.

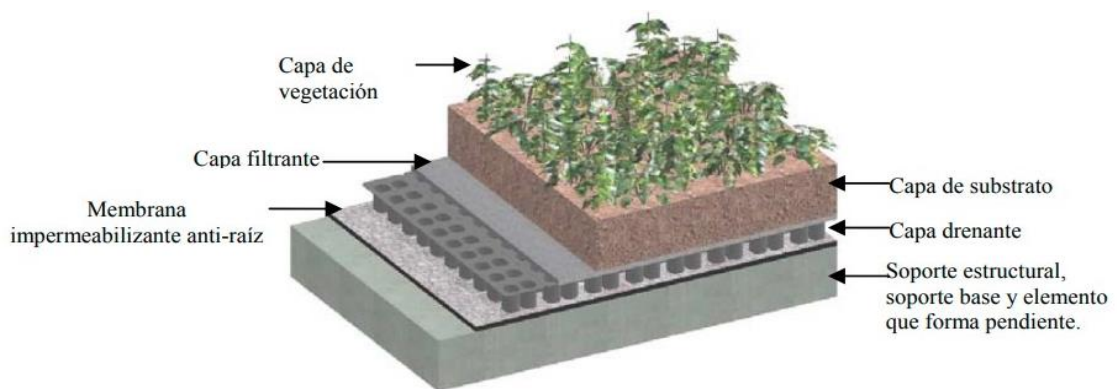
Tomando en cuenta información consultada de diferentes investigaciones relacionadas con el tema de investigación se evidencia que los TV generan un beneficio en cuestión de la transferencia de calor, entre otros, se tomaron en cuenta investigaciones simuladas, experimentales, así como artículos científicos, entre los documentos analizados

se aborda el tipo de vegetación, análisis estructural, sustrato, riego, mantenimiento y recomendaciones a tomar en cuenta cuando se implementan los TV.

Asimismo, los avances normativos en México particularmente la NADF-013-RNAT-2017 han contribuido a estandarizar los componentes mínimos para la instalación de cubiertas naturadas, promoviendo la incorporación de vegetación nativa, sistemas de riego eficiente y mantenimiento seguro en entornos urbanos. En la Figura 9 se presentan los componentes básicos definidos en dicha normativa.

Figura 9

Componentes básicos para una cubierta naturada



Nota. Componentes básicos para una cubierta naturada, descrito en la NADF-013-RNAT-2007. Retomada de GODF, Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007

Finalmente, el análisis comparativo revela que la efectividad de los techos verdes depende de la adecuada selección de especies y sustratos, adaptados a las condiciones de aridez y radiación solar intensa.

En síntesis, los estudios revisados demuestran que los techos verdes representan una estrategia pasiva eficaz para reducir la ganancia térmica, mejorar el confort interior y disminuir la demanda energética en edificaciones ubicadas en climas cálidos y secos. La evidencia empírica y los modelos de simulación confirman que el desempeño térmico

depende de factores como la densidad de la vegetación, el tipo de sustrato, el espesor del sistema y la correcta gestión hídrica.

Además, las normativas nacionales, como la NADF-013-RNAT-2017, consolidan criterios técnicos que facilitan la aplicación práctica de esta tecnología en el contexto mexicano, impulsando su adopción en edificaciones sostenibles.

A partir de los resultados y tendencias identificadas en la literatura, se reconoce la necesidad de sustentar teóricamente los mecanismos físicos, bioclimáticos y ecológicos que explican el comportamiento térmico de las cubiertas naturadas. En este sentido, el siguiente apartado desarrolla las teorías que fundamentan la presente investigación, permitiendo establecer un marco conceptual sólido que articule la evidencia empírica con los principios científicos del desempeño ambiental de los techos verdes.

1.4 Teorías

El presente estudio se sustenta en una serie de teorías que proporcionan un marco conceptual sólido para comprender el comportamiento térmico de las edificaciones en climas cálidos y el papel de los techos verdes como estrategia pasiva de mitigación. Estas teorías permiten analizar la relación entre el entorno construido y el medio ambiente desde enfoques sustentables, bioclimáticos, energéticos y urbanos. A partir de estas bases, se articula el análisis de los fenómenos observados durante la investigación experimental.

1.4.1 Teoría eje: Arquitectura Sustentable

La arquitectura sustentable no solo representa una tendencia dentro del diseño contemporáneo, sino una necesidad derivada de los desafíos ambientales y energéticos globales (Stucke, Vedoya & Morán, 2019). Esta corriente busca el equilibrio entre la edificación y su entorno, procurando el aprovechamiento racional de los recursos

naturales como la temperatura, humedad, viento, radiación solar y vegetación, sin comprometer el bienestar de las generaciones futuras.

Dueñas (2013), en sus reflexiones sobre arquitectura sustentable en México, señala que esta visión se gestó a partir del concepto de ecodesarrollo surgido en 1976, en el contexto de la crisis petrolera. Posteriormente, en la Cumbre de la Tierra celebrada en Río de Janeiro en 1992, se introdujo el término *desarrollo sustentable*, enfatizando la necesidad de que los edificios funcionen como organismos vivos: consumen recursos, producen desechos y mantienen una relación activa entre el interior y el exterior a través de su envolvente. La eficiencia de esa relación es la que define su sustentabilidad (Dueñas, 2013, p. 83).

En este marco, los techos verdes representan una estrategia arquitectónica alineada con los principios de sustentabilidad, al promover el confort térmico mediante mecanismos pasivos. Su capacidad de aislamiento natural se debe a la vegetación y el sustrato, los cuales absorben y almacenan parte de la energía solar, liberándola de forma gradual y regulando así la temperatura interior. Esta acción contribuye, además, a mitigar el efecto isla de calor urbano, mejorar la calidad del aire y aumentar la biodiversidad en contextos urbanos densos (Méndez & Guerrero, 2022; Berardi, 2016).

1.4.2 Teoría de Apoyo: La Arquitectura Bioclimática

La arquitectura bioclimática constituye un enfoque proyectual que busca responder a las condiciones climáticas del entorno para maximizar el confort interior con el menor consumo energético posible. Se fundamenta en el aprovechamiento de recursos naturales —radiación solar, viento, vegetación, sombra y orientación— para regular de forma pasiva la temperatura, humedad y ventilación de los espacios.

Solano García, académico de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), afirma que la arquitectura bioclimática “cuida el medio ambiente y aprovecha energías alternativas provenientes de fuentes naturales en el sitio, con el objetivo de asegurar una calidad de vida adecuada para los habitantes del espacio arquitectónico” (Herrera & Reséndiz, 2023).

Los techos verdes encajan perfectamente en este enfoque al actuar como filtros térmicos, reducir las ganancias de calor en épocas cálidas y mejorar el microclima inmediato. Además, permiten un diseño más eficiente en términos energéticos al disminuir la necesidad de sistemas mecánicos de climatización (Oliveira & Steemers, 2017).

1.4.3 Teorías Complementarias

Teoría del Confort Térmico en Climas Cálidos. Esta teoría estudia las condiciones que permiten percibir un ambiente como térmicamente confortable, considerando variables como la temperatura del aire, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento. En climas cálidos, el confort depende en gran medida del control de las ganancias térmicas por radiación directa y la posibilidad de disipación del calor acumulado. De acuerdo con Givoni (1998), la percepción térmica está íntimamente ligada a las estrategias pasivas que emplee la edificación para adaptarse al clima local.

Teoría del Balance Térmico o de Equilibrio de Calor. Propone que el confort térmico se alcanza cuando el calor producido por el cuerpo humano se equilibra con el que se disipa al ambiente mediante mecanismos como la convección, radiación, evaporación y conducción. Esta teoría permite entender cómo los techos verdes influyen en el balance térmico del edificio al reducir la transferencia de calor desde la cubierta

hacia el interior, contribuyendo a mantener un entorno confortable sin recurrir a equipos de refrigeración (ASHRAE, 2017).

Teoría de la Infraestructura Verde Urbana. Si bien es menos técnica en términos térmicos, esta teoría aporta una visión integradora al considerar a los techos verdes como parte de un sistema urbano resiliente. Según Benedict y McMahon (2006), la infraestructura verde promueve soluciones ecológicas que fortalecen la sostenibilidad urbana mediante redes de espacios naturales interconectados, incluyendo techos verdes, que prestan servicios ecosistémicos como el control térmico, la retención pluvial y la mejora de la calidad ambiental.

En síntesis, las teorías expuestas ofrecen una base conceptual coherente que respalda el diseño, implementación y evaluación de techos verdes en zonas urbanas cálidas. Desde la sustentabilidad arquitectónica hasta el confort térmico y la infraestructura verde, cada enfoque contribuye a entender cómo estas soluciones constructivas inciden en la eficiencia energética, el bienestar habitacional y la resiliencia climática del entorno edificado.

1.5 Teóricos

El estudio de los techos verdes como estrategia pasiva de mitigación térmica y adaptación al cambio climático requiere apoyarse en el pensamiento y las aportaciones de diversos teóricos que han desarrollado investigaciones, propuestas y aplicaciones en el campo de la arquitectura sustentable. Estos autores han contribuido a consolidar el conocimiento desde distintas perspectivas: algunos sentaron las bases conceptuales de la bioconstrucción y las soluciones basadas en la naturaleza, otros han desarrollado aplicaciones concretas en contextos urbanos, y más recientemente, diversos

investigadores han generado evidencia científica sobre el desempeño térmico, ambiental y social de los techos verdes en distintas latitudes.

Estas perspectivas permiten comprender el desarrollo conceptual, técnico y experimental de los techos verdes (variable independiente) y su incidencia en la transferencia de calor (variable dependiente), en climas cálidos secos. La revisión de estos referentes no solo permite comprender la evolución histórica y conceptual de los techos verdes, sino también identificar enfoques metodológicos y experiencias aplicables al contexto mexicano. En este sentido, se distinguen tres grupos de aportaciones:

1. Teóricos base, que sentaron los fundamentos de la arquitectura sustentable y de la integración de vegetación en edificaciones.
2. Teóricos consolidados, cuyos trabajos han fortalecido la práctica profesional y la investigación aplicada.
3. Teóricos de vanguardia, que en años recientes han generado avances significativos en la evaluación térmica, energética y ambiental de los techos verdes.

1.5.1 Teóricos Base

Gernot Minke. Arquitecto alemán (1937–2021), considerado pionero en la bioconstrucción planteó la utilización de materiales naturales y vegetación como parte integral del diseño arquitectónico. En su obra *Building with Earth* (2012, Birkhäuser), demostró que los techos con sustratos naturales actúan como sistemas de aislamiento térmico.

Aporte a la Variable Techo Verde. Conceptualiza el techo como parte viva del edificio que mejora la eficiencia energética y el ciclo térmico.

Aporte a la Variable Transferencia de Calor. Evidencia la reducción de la ganancia térmica gracias al uso de capas vegetales y de tierra que incrementan la inercia térmica.

Ralph Hancock. Paisajista galés (1893–1950), diseñador de los jardines del Rockefeller Center (Nueva York) y Derry & Toms (Londres). Su trabajo anticipó el uso de cubiertas vegetales con funciones microclimáticas.

Aporte a Techo Verde. Integra la vegetación como elemento estético y funcional del entorno construido.

Aporte a Transferencia de Calor. Introduce el principio de enfriamiento evaporativo, al reducir la temperatura superficial mediante evapotranspiración.

1.5.2 Teóricos Consolidadores

En un segundo nivel, se encuentran los teóricos consolidados, quienes han desarrollado investigaciones aplicadas y proyectos que demuestran la viabilidad técnica y ambiental de los techos verdes en distintos contextos urbanos. Estos autores han fortalecido el conocimiento al generar estudios de caso, experimentaciones y propuestas normativas que han servido de referencia para la práctica arquitectónica y el diseño urbano sustentable.

Emilio Ambasz. Arquitecto argentino (n. 1943), precursor de la arquitectura ecológica y del concepto verde sobre verde, donde la vegetación es parte del sistema constructivo. En proyectos como la Casa de Córdoba y el Museo de Arte y Cine de Sevilla, Ambasz propuso techos integrados al paisaje, demostrando su potencial térmico y simbólico.

Aporte a Techo Verde. Promueve la fusión entre naturaleza y arquitectura como estrategia sustentable.

Aporte a Transferencia de Calor. Sus proyectos muestran cómo la cubierta vegetal actúa como una capa de aislamiento térmico pasivo que reduce la demanda energética.

Gabriel Castañeda Nolasco. Investigador mexicano de la UNACH, desarrolló el sistema Domotej–Techo Verde, un modelo autoconstruible y de bajo costo. Su propuesta, publicada en el Repositorio Institucional UNICACH (2014), demostró reducciones significativas de temperatura superficial e interior en viviendas sociales.

Aporte a Techo Verde. Adapta la tecnología a contextos de bajos recursos mediante materiales reciclados.

Aporte a Transferencia de Calor. Comprueba experimentalmente la reducción térmica en cubiertas expuestas, fortaleciendo la evidencia empírica en zonas áridas mexicanas.

1.5.3 Teóricos Vanguardistas

Finalmente, los teóricos de vanguardia representan las aportaciones más recientes en el campo de estudio. Sus investigaciones se centran en la evaluación térmica, energética y ecológica de los techos verdes, apoyadas en herramientas experimentales y de simulación. Estos trabajos permiten ampliar la comprensión de su desempeño en climas extremos, así como su potencial como estrategia integral de adaptación al cambio climático en entornos urbanos contemporáneos.

Cuevas-Acuña, M. L., et al. (2024). En el artículo Evaluación experimental de un prototipo de techo verde en clima cálido seco (Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento, 12(26)), se analiza un prototipo instalado en Zacatecas, México.

Aporte a Techo Verde. Valida experimentalmente un sistema de techos verdes en clima árido, considerando sustrato y vegetación nativa.

Aporte a Transferencia de calor. Registra una reducción promedio de 4.03 °C en temperatura interior y retardo térmico respecto a techos convencionales.

Sánchez-Mora, M., Rodríguez-García, M., & Benavides, H. (2023). En Modelado matemático de azoteas verdes extensivas como solución al sobrecalentamiento urbano (Ingenierías, 26(95), 95–110), se modela el efecto térmico de cubiertas verdes en diferentes regiones mexicanas.

Aporte a Techo Verde. Desarrolla un modelo aplicable a viviendas con baja capacidad aislante.

Aporte a Transferencia de Calor. Cuantifica la disminución de amplitud térmica, la temperatura media interior y el ahorro energético, vinculando vegetación y comportamiento térmico.

Ordóñez-López, M. E., & Pérez-Sánchez, R. (2015). En Evaluación térmica comparativa de un techo verde y un techo blanco en un edificio de oficinas (Acta Universitaria, 25(2), 64–72), se comparan ambos sistemas en Guanajuato.

Aporte a Techo Verde. Analiza su desempeño real en edificación existente.

Aporte a Transferencia de Calor. Demuestra que el TV disminuye las fluctuaciones térmicas y mantiene temperaturas interiores más estables, lo que confirma su función de barrera térmica.

Eréndira Arellano Leyva. Investigadora del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (UNAM). Sus estudios en servicios ecosistémicos de azoteas verdes (Informe técnico IING-UNAM, 2022) destacan su papel en la regulación térmica urbana.

Aporte a Techo Verde. Evalúa beneficios ambientales y de calidad del aire.

Aporte a Transferencia de Calor. Cuantifica el efecto de la evapotranspiración sobre la disipación térmica en techos vegetados urbanos.

En síntesis, los aportes de los teóricos base, consolidados y de vanguardia constituyen una base conceptual que sustenta la presente investigación. Gracias a sus enfoques se ha podido comprender la evolución histórica de los techos verdes, sus fundamentos constructivos y ambientales, así como su validación mediante estudios experimentales y de simulación. Estos referentes resultan esenciales para contextualizar el tema en el ámbito de la arquitectura sustentable y las estrategias pasivas de adaptación al cambio climático.

A partir de este marco teórico, es posible avanzar hacia la revisión de los estudios previos realizados en climas cálidos, donde se han evaluado los techos verdes en condiciones similares a las de Culiacán, Sinaloa. Dichos estudios permiten identificar metodologías, resultados y vacíos de conocimiento que orientan y justifican el presente trabajo de investigación.

1.6 Estudios Previos en Climas Cálidos Secos

Los techos verdes como estrategia de mitigación térmica, especialmente en regiones de clima cálido seco. Esta revisión incluye artículos científicos, tesis de posgrado y literatura técnica publicada en distintos contextos internacionales, nacionales y regionales, con el propósito de contrastar metodologías, resultados y alcances. La

selección se orientó a investigaciones que presentan condiciones ambientales comparables con Culiacán, Sinaloa, donde se desarrolla la presente investigación, priorizando aquellas con datos experimentales y metodologías aplicables.

1.6.1 Estudios Internacionales

La literatura internacional evidencia que el desempeño de los techos verdes en climas cálidos depende de factores como la elección de especies vegetales, la composición del sustrato, el sistema de riego y las prácticas de mantenimiento. A diferencia de regiones templadas, donde la tecnología tiene mayor tradición, en zonas áridas y semiáridas los estudios han buscado validar su viabilidad como estrategia de confort térmico y eficiencia energética.

En Argelia, Fezzioui y Benaichata (2021) realizaron simulaciones con TRNSYS para comparar techos verdes con techos convencionales (concreto), demostrando reducciones en el consumo energético y en las horas de discomfort térmico, entendido como la desviación del rango de confort definido por los índices PMV y PPD (Djongyang, Tchinda & Njomo, 2010). De forma complementaria, Zaina et al. (2021) elaboraron una revisión técnica en Doha, Qatar, recomendando sistemas de sustrato ligero, drenajes eficientes y especies resistentes al calor, además de resaltar la importancia del mantenimiento como condición de eficacia.

En Israel, Rottenberg (2024) evaluó la respuesta de especies crasas instaladas en techos extensivos sin aporte de riego, encontrando una cobertura vegetal significativa al cabo de 18 meses, lo que evidenció tanto su adaptación natural como la posibilidad de ahorro hídrico. De manera similar, Mabdeh et al. (2021) en Jordania confirmaron que los

techos verdes en contextos semiáridos contribuyen a mejorar el confort térmico, reducir el efecto de isla de calor urbana y elevar la eficiencia energética de los edificios.

1.6.2 Estudios Nacionales

En México, la producción académica reciente ha comenzado a generar evidencia específica sobre el desempeño de los techos verdes en climas áridos y semiáridos. En Mexicali, investigaciones con modelos de simulación han demostrado que estos techos permiten disminuir la temperatura interior y mejorar la eficiencia térmica en viviendas de interés social (Tobías-Salas et al., 2023). En el noroeste del país, Sahagún Valenzuela et al. (2023) analizaron el efecto del espesor del sustrato, identificando que espesores de entre 10 y 15 cm logran reducciones térmicas de hasta 8 °C en interiores, equilibrando desempeño y consumo de agua.

En Torreón, Coahuila, Quiroa Herrera, Castañeda Nolasco y Villanueva Solís (2021) midieron con sensores HOBO la temperatura de una losa convencional frente a una cubierta verde instalada en vivienda social. Reportaron una disminución de hasta 9 °C en la ganancia térmica del techo, lo que repercutió en la reducción de la temperatura interior. Los autores también destacaron la pertinencia de usar especies nativas y sustratos accesibles como medida para reducir costos de mantenimiento y consumo de agua.

1.6.3 Estudios Académicos

En el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), López Silva (2020) comparó techos verdes con especies C3 y CAM en Ensenada (clima semiárido), concluyendo que las especies suculentas tipo CAM, como el *Sedum*, mostraron un mejor desempeño térmico y menor demanda

hídrica. Se observaron reducciones de hasta 12 °C en la superficie y 9 °C en los interiores.

Por otro lado, en Mérida, Yucatán, donde se tiene un clima cálido húmedo, Jiménez López (2013) evaluó techos verdes en módulos de prueba los cuales fueron contruidos con block de concreto con las siguientes características; ancho de 0.92 m x 1.22 m de profundidad y 0.81 m de altura. Su investigación reportó disminuciones de entre 3 y 6 °C en el interior de los módulos los cuales hacían referencia los espacios de una vivienda de interés social en escala 1:4, además de un aumento en la inercia térmica del espacio, lo que redujo la necesidad de ventilación mecánica.

Finalmente, Cortés Sosa (2019), en Poza Rica, Veracruz, usando 3 tipos de módulos de prueba de con base de 30x30cm y 40 cm de altura, los cuales fueron colocados sobre una losa de concreto de una vivienda, comparó dos sistemas de techos verdes; extensivo donde los módulos tenían cara de 12 cm de sustrato, semi-intesivo con 20 cm de sustrato y un espacio más como testigo para las diferencias. Este último redujo la temperatura interior entre 4 °C, lo que confirma su viabilidad en contextos urbanos con recursos limitados.

Se genera un resumen con información clave de los resultados obtenidos en diferentes investigaciones analizadas bajo el interés por haber sido desarrolladas en clima cálido entre ellas tenemos artículos, estudios experimentales y tesis de maestría, las cuales forman parte de los documentos analizados para generar la base teórica y tomar en cuenta el desarrollo de la presente investigación, donde se aplican diferentes metodologías para llegar a un resultado, véase Tabla 9.

Tabla 9*Resumen de investigaciones en climas cálidos*

Autor(es) y año	Tipo de estudio	Lugar / Clima	Resultados clave
Quiroa-Herrera et al. (2021)	Artículo publicado	Torreón / árido–semiárido	-9 °C en ganancia térmica; mejoras en interior; necesidad de especies nativas y sustrato económico
Fezzioui & Benaichata (2021)	Artículo científico	Argelia / árido seco	Reducción térmica y energía con riego eficiente
Zaina et al. (2021)	Revisión técnica	Qatar / árido cálido	Guía de diseño para techos verdes en clima desértico
Rottenberg (2024)	Estudio experimental	Israel / semiárido	Cobertura vegetal eficiente sin riego artificial
Mabdeh et al. (2021)	Artículo técnico	Jordania / semiárido	Mejora en confort térmico y eficiencia energética
Tobias Salas et al. (2024)	Artículo técnico	Mexicali / cálido seco	Reducción interior térmica y ahorro energético
Sahagún Valenzuela et al. (2023)	Artículo científico	Noroeste de México	Reducción térmica según espesor del sustrato
López Silva (2020)	Tesis de maestría	Ensenada / semiárido	CAM reduce hasta 12 °C superficial y 9 °C interior
Jiménez López (2013)	Tesis de maestría	Mérida / cálido húmedo	Reducción térmica de 3–6 °C en vivienda económica
Cortés Sosa (2019)	Tesis de maestría	Poza Rica / cálido húmedo	Reducción de 4–6 °C y 25 % menor costo en mantenimiento

Nota. Cada investigación aporta información relevante a tomar en cuenta en la presente y futuras investigaciones.

En conjunto, los estudios revisados confirman que los techos verdes representan una estrategia pasiva efectiva para la mitigación del calor urbano en climas cálidos y semiáridos, con reducciones térmicas interiores que varían entre 3 °C y 12 °C, dependiendo de las condiciones climáticas, el espesor del sustrato y las especies vegetales utilizadas. Se destaca el mejor desempeño de las especies suculentas tipo CAM por su baja demanda hídrica y alta capacidad de retención de humedad, lo cual las posiciona como una alternativa viable en zonas con estrés hídrico.

En síntesis, los antecedentes académicos revisados constituyen una base práctica sólida que orienta el desarrollo de la presente investigación, al evidenciar la necesidad de adecuar los sistemas de techos verdes a las condiciones climáticas, materiales y económicas propias del entorno de estudio. El siguiente apartado estado de la práctica, se centra en la aplicación real y las experiencias constructivas de los techos verdes en contextos urbanos contemporáneos, analizando proyectos implementados, normativas vigentes, materiales utilizados y resultados observados en campo.

A diferencia de los estudios académicos, este apartado aborda el conocimiento derivado de la práctica profesional, incluyendo ejemplos de obras, lineamientos técnicos, programas institucionales y experiencias comunitarias que han permitido consolidar el uso de cubiertas vegetales como soluciones de infraestructura verde. Este análisis permite identificar los avances alcanzados, las limitaciones tecnológicas existentes y las oportunidades de mejora para su implementación en zonas de clima cálido.

1.7 Estado de la Práctica

El estado de la práctica en el uso de techos verdes como estrategia pasiva para la reducción de temperatura interior en edificaciones refleja un creciente interés por soluciones sostenibles que contribuyan al confort térmico y a la mitigación de los efectos del cambio climático, particularmente en regiones cálidas. A nivel internacional, múltiples proyectos han demostrado la viabilidad técnica, económica y ambiental de estos techos, con aplicaciones tanto en edificaciones residenciales como en inmuebles comerciales y públicos.

En países como Alemania, Suiza, Canadá y Singapur se han consolidado como referentes en la implementación de techos verdes. Alemania destaca por contar con lineamientos técnicos estandarizados desde los años ochenta, elaborados por la Sociedad

de Investigación para el Desarrollo del Paisaje y la Construcción del Paisaje, sus siglas en *Aleman* (FLL), que han servido como referencia para otras naciones (Berardi, 2016). De manera similar, ciudades como Zúrich, en Suiza, establecieron desde 1991 la obligatoriedad de instalar techos verdes en edificaciones con techos planos, lo que ha permitido combinar beneficios de mitigación térmica con la conservación de biodiversidad urbana (Oberndorfer et al., 2007).

En Norteamérica, Toronto fue pionera al promulgar en 2009 la primera normativa obligatoria de techos verdes en el continente, conocida como *Green Roof Bylaw*, que ha impulsado su aplicación en miles de metros cuadrados de superficie construida (Banting et al., 2005). Por su parte, Singapur ha promovido la vegetación en altura mediante subsidios gubernamentales, logrando posicionarse como ejemplo de integración de naturaleza y urbanismo (Peng & Jim, 2015).

En síntesis, la práctica internacional demuestra que los techos verdes pueden integrarse eficazmente en la planeación urbana cuando existen políticas claras, normativas específicas e incentivos adecuados que promuevan su adopción. Estas experiencias evidencian que la combinación entre investigación científica, regulación técnica y apoyo institucional resulta clave para garantizar su éxito a largo plazo. Asimismo, la diversificación de sus aplicaciones desde edificios públicos hasta desarrollos habitacionales ha permitido comprobar su rentabilidad ambiental y social, al reducir la temperatura superficial y mejorar el confort térmico interior.

No obstante, en regiones con climas cálidos y recursos limitados, como en gran parte de América Latina, la práctica aún se encuentra en una etapa de consolidación. Esto plantea la necesidad de adaptar los modelos internacionales a las condiciones locales,

considerando factores como el tipo de vegetación, la disponibilidad de materiales y los costos de mantenimiento. De esta manera, el análisis del estado de la práctica no solo ofrece una visión comparativa del avance global, sino que también orienta la aplicación contextualizada de los techos verdes como una estrategia sostenible y viable para la mitigación térmica urbana.

En este contexto global de adopción y madurez tecnológica, resulta pertinente analizar cómo estas experiencias internacionales han influido en el desarrollo y adaptación de los techos verdes en el ámbito nacional. Aunque México presenta condiciones climáticas y socioeconómicas distintas, las iniciativas implementadas en diversas ciudades reflejan un interés creciente por integrar estrategias de infraestructura verde como respuesta a los desafíos térmicos y ambientales urbanos.

En México, el desarrollo de techos verdes ha sido gradual y se encuentra en una etapa de consolidación. Inicialmente, se impulsaron mediante proyectos piloto y estudios académicos orientados a demostrar su eficiencia térmica e hídrica (Castañeda, 2016; López, 2020). Posteriormente, gobiernos locales como el de la Ciudad de México establecieron programas de incentivos fiscales para edificaciones que incorporen esta tecnología, generando experiencias aplicadas en viviendas, escuelas y hospitales (Sosa et al., 2017).

En Guadalajara, universidades y centros de investigación han desarrollado proyectos de evaluación térmica y energética en viviendas experimentales, destacando la pertinencia de adaptar especies vegetales locales para garantizar un mejor desempeño y menor costo de mantenimiento (Castañeda, 2016). En Monterrey, los esfuerzos se han orientado hacia la incorporación de techos verdes en edificios institucionales y

comerciales, donde se ha medido su contribución a la eficiencia energética y al confort térmico en climas semiáridos (González-Maldonado et al., 2019).

En el caso del noroeste de México, las experiencias son aún incipientes, pero se observa un creciente interés académico y profesional. Investigaciones realizadas en Hermosillo, donde las temperaturas pueden superar los 40 °C en verano (López, 2020; Sahagún, 2019). Estas iniciativas han evidenciado reducciones significativas en la temperatura interior de los espacios estudiados, lo que confirma la pertinencia de los techos verdes como estrategia pasiva de mitigación térmica.

A fin de sintetizar las experiencias internacionales y nacionales en la implementación de techos verdes, la Tabla 10 se presenta un panorama comparativo del estado de la práctica. Esta síntesis permite identificar los avances, políticas públicas, resultados térmicos y retos específicos en diversos contextos geográficos, proporcionando un marco de referencia para comprender el desarrollo de esta tecnología en regiones con condiciones climáticas variadas.

Tabla 10

Estado de la Práctica en la Implementación de Techos Verdes

Región / País	Situación actual	Normativas / Políticas relevantes	Hallazgos y aportes principales
Alemania	Uso consolidado desde los años 80.	Lineamientos FLL para diseño y operación de techos verdes.	Base técnica internacional; alto desempeño térmico y ecológico.
Suiza (Zúrich)	Implementación obligatoria en techos planos desde 1991.	Regulación municipal de techos verdes.	Mitigación térmica y conservación de biodiversidad urbana.
Canadá / Toronto	Aplicación amplia en edificios públicos y privados.	<i>Green Roof Bylaw</i> desde 2009.	Expansión masiva de techos verdes; reducción de temperatura urbana.
Singapur	Integración a gran escala en edificios verticales.	Programas de subsidios gubernamentales.	Referente mundial en infraestructura verde en altura.
México (General)	Etapas de consolidación; proyectos piloto.	Incentivos fiscales en CDMX.	Aplicaciones en viviendas, escuelas y hospitales; reducción térmica.

Región / País	Situación actual	Normativas / Políticas relevantes	Hallazgos y aportes principales
Guadalajara	Proyectos experimentales en clima cálido.	Investigación académica local.	Importancia de especies vegetales locales para mejor desempeño.
Monterrey	Uso en edificios institucionales y comerciales.	Iniciativas locales de eficiencia energética.	Mejora del confort térmico en climas semiáridos.
Noroeste de México (Hermosillo)	Aplicación incipiente; estudios recientes.	Proyectos universitarios.	Reducción significativa en temperatura interior bajo calor extremo.
América Latina (General)	Desarrollo limitado por recursos y clima.	Modelos adaptados de experiencias internacionales.	Necesidad de contextualizar vegetación, materiales y costos.

Del análisis comparativo presentado en la Tabla 10 se observa que los países con mayor madurez en la implementación de techos verdes comparten tres elementos clave: normativas claras, investigación científica continua y programas de apoyo institucional. Estas condiciones han permitido demostrar la capacidad de los techos verdes para reducir la temperatura superficial y mejorar el confort térmico interior, aspectos directamente relacionados con el Objetivo General de esta investigación.

En el caso de México y en particular de regiones cálidas como el noroeste del país, aunque las iniciativas aún son iniciales, los estudios existentes confirman su potencial como estrategia pasiva de mitigación térmica. Esto evidencia la pertinencia de realizar mediciones a escala real (1:1), tal como lo plantean los Objetivos Específicos, con el fin de aportar datos locales que permitan adaptar estas soluciones a las condiciones climáticas y constructivas de las edificaciones nacionales. Es relevante conocer algunos de los proyectos internacionales en los que se ha aplicado el techo verde como se muestra a continuación.

1.7.1 Proyectos Aplicados Panorama Internacional

El presente subapartado profundiza en casos de estudio y proyectos aplicados a nivel internacional que ejemplifican la implementación práctica de techos verdes en

distintos contextos climáticos y urbanos. Se analizan experiencias representativas que han permitido medir con precisión sus beneficios térmicos, energéticos y ambientales, constituyendo referentes técnicos útiles para el desarrollo de soluciones adaptadas a regiones cálidas.

La aplicación de techos verdes a nivel internacional ha evolucionado de manera significativa durante las últimas décadas, consolidándose como una estrategia de adaptación al cambio climático y de mejora de la calidad ambiental urbana. Diversos proyectos arquitectónicos en distintas latitudes han demostrado que estos techos no solo cumplen funciones estéticas, sino que también ofrecen beneficios comprobables en términos de reducción de la temperatura superficial, retención de agua pluvial, incremento de la biodiversidad y aislamiento térmico (Oberndorfer et al., 2007; Berardi, 2016).

El análisis de experiencias internacionales permite identificar cómo los techos verdes han sido adaptados a distintos contextos climáticos y tipológicos. En ciudades con climas templados y húmedos, como Vancouver o Varsovia, se han implementado proyectos de gran escala con techos verdes intensivos que combinan funciones culturales y ecológicas. Por otro lado, en entornos cálidos y urbanos densos como San Francisco, Chicago o Singapur, los techos verdes se han utilizado para mitigar el efecto de isla de calor y como espacios recreativos abiertos al público (Getter & Rowe, 2006; Vijayaraghavan, 2016).

A continuación, se presentan algunos proyectos internacionales emblemáticos que ilustran la implementación de techos verdes en distintas tipologías y condiciones

climáticas. Estos casos han servido como referentes en la práctica arquitectónica y ofrecen evidencia de los beneficios ambientales, térmicos y sociales que generan.

California Academy of Sciences, San Francisco, EE. UU. Esta institución cultural inaugurada en 2008 integra un *living roof* ondulado de aproximadamente una hectárea. La cubierta está compuesta por 1.7 millones de plantas distribuidas en bandejas biodegradables sobre un sustrato de 15 cm, lo que proporciona aislamiento térmico y mejora la eficiencia energética. Se estima que el 87 % de la superficie es vegetada y que el sistema es capaz de retener la totalidad de la escorrentía pluvial en eventos moderados, contribuyendo además a mitigar el efecto de isla de calor urbano California Academy of Sciences, s. f., véase Figura 10.

Figura 10

TV California Academy of Sciences, San Francisco, EE. UU.



Nota. Retomado de Academia de ciencias de California / Renzo Piano Building Workshop + Stantec Architecture, 2008, <https://acortar.link/q2oV3Q> , CC BY 2.0.

ACROS Fukuoka Prefectural International Hall, Fukuoka, Japón. Este edificio, diseñado por Emilio Ambasz y concluido en 1995, destaca por su innovadora fachada y cubierta escalonada que integra jardines en terrazas. El área ajardinada en

cubierta alcanza los 5,400 m², con más de 50,000 plantas de unas 120 especies, derivadas tanto de plantaciones iniciales como de procesos naturales de dispersión. El proyecto buscó devolver a la ciudad el parque que ocupaba el volumen construido, integrando espacio verde al tejido urbano (ACROS Fukuoka, s. f.), véase Figura 11.

Figura 11

ACROS, Fukuoka, Japón



Nota. Una forma efectiva de reponer el espacio ocupado por el edificio al tener colocada vegetación en cada una de sus terrazas por nivel, retomado de Cosas de Arquitectos, 2009, <https://acortar.link/jAz5Mx> CC BY 2.0.

School of Art, Design & Media (ADM), Nanyang Technological University, Singapur. Este campus universitario diseñado por CPG Consultants en 2006 incorpora techos inclinados transitables con césped y especies locales, con el diseño logran rescatar prácticamente todo el espacio usado para la construcción del edificio al cubrir lo que en muchos casos se convierte en un área gris y losas expuestas para la ganancia de calor por radiación solar. Los techos reducen la ganancia térmica en los espacios interiores, disminuyen la temperatura ambiente inmediata y permiten captar lluvia para riego (Greenroofs.com, 2018), véase Figura 12.

Figura 12

Green roof art school in Singapore



Nota. Una forma efectiva de dar continuidad al área ajardinada con las losas que inician a nivel del suelo y cubren cada uno de los módulos del edificio, retomada de *designautore*, 2015, <https://acortar.link/E7KXKn>

Vancouver Convention Centre West, Vancouver, Canadá. Inaugurado en 2009 y diseñado por *LMN Architects* junto con *MCM* y *Stantec*, este centro de convenciones alberga la cubierta verde no industrial más grande de Norteamérica, con una superficie de 24,000 m². Está plantada con más de 400,000 especies autóctonas que favorecen la biodiversidad y proporcionan aislamiento térmico, reduciendo las ganancias de calor en verano y las pérdidas en invierno (*Vancouver Convention Centre, s. f.*), véase Figura 13. Un ejemplo más de que los techos verdes pueden ser aplicados en cualquier tipo de edificación, solo es necesario considerar las cargas adicionales que se van a generar sobre la estructura para no provocar daños.

Figura 13*Vancouver Convention Centre West*

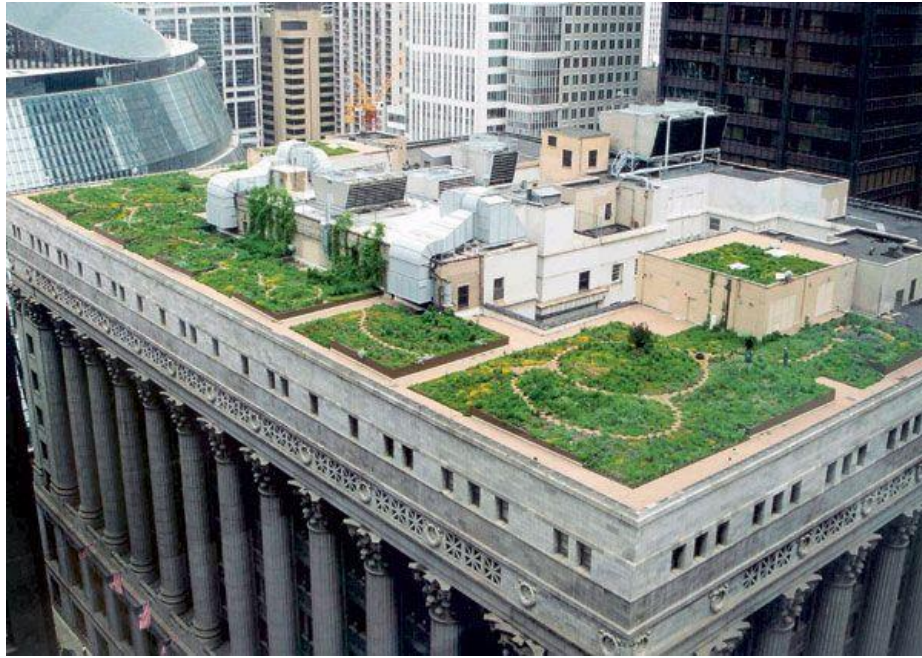
Nota. Adaptada de greenroofs, Vancouver Convention Centre West / Expansion Project, 2025, <https://acortar.link/gWEBA6>

Chicago City Hall, Chicago, EE. UU. El techo verde del Ayuntamiento de Chicago fue implementado como parte de un proyecto de investigación impulsado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, cuyo objetivo principal consistió en disminuir el impacto de la isla de calor urbana y favorecer la calidad del aire en la ciudad.

En cuanto a su configuración, el sistema se diseñó como un techo verde semi-intensivo que integró aproximadamente 20,000 plantas herbáceas, 112 arbustos y dos árboles. La profundidad del sustrato varió entre 7.5 cm en las secciones extensivas y hasta 61 cm en las intensivas, con un promedio de 20 cm en las áreas semi-intensivas (*City of Chicago, s. f.; National Park Service, 2022*), véase Figura 14. En este proyecto de aplico diferente espesor de sustrato para lograr integrar diferente tipo de vegetación, con ello se demuestra que se pueden alternar diferentes tipos de techos vedes en uno solo.

Figura 14

Chicago City Hall, Chicago, EE. UU.



Nota. Retomada de land8, *Cómo el techo verde del Ayuntamiento de Chicago está ecologizando la jungla de hormigón*, 2015, <https://acortar.link/y0RrDg>

En conjunto, los proyectos revisados demuestran que la implementación de techos verdes en distintas geografías ha trascendido el ámbito experimental para consolidarse como una solución arquitectónica madura, versátil y eficaz frente a diversos desafíos ambientales. Desde cubiertas extensivas destinadas a mitigar la isla de calor hasta sistemas intensivos integrados en complejos culturales y urbanos, estas experiencias internacionales evidencian la capacidad de los techos verdes para adaptarse a condiciones climáticas, normativas y funcionales diversas sin perder eficiencia ni pertinencia.

A partir de la revisión de estos casos emblemáticos a nivel internacional, es evidente que la implementación de techos verdes ha alcanzado un nivel de madurez técnica y operativa en diversos países, donde las políticas públicas, la investigación

científica y el diseño arquitectónico han convergido para consolidar soluciones altamente efectivas frente a los desafíos térmicos y ambientales urbanos. Este panorama global no solo confirma la versatilidad de los techos verdes en distintos contextos climáticos y tipológicos, sino que también ofrece valiosas lecciones para regiones que buscan fortalecer su propia infraestructura verde.

En este sentido, resulta pertinente trasladar el análisis hacia la experiencia nacional, con el fin de comprender cómo estas referencias han influido en las iniciativas desarrolladas en México y de qué manera se han adaptado a las condiciones climáticas, económicas y sociales del país. De ello se ocupa el siguiente apartado.

1.7.2 Proyectos Aplicados Panorama Nacional

En México, la incorporación de techos verdes se ha desarrollado principalmente en las dos últimas décadas como parte de estrategias de sostenibilidad urbana y eficiencia energética. Diversas iniciativas gubernamentales, académicas y privadas han impulsado su implementación en edificios públicos, habitacionales y comerciales, reconociendo su potencial para reducir la temperatura superficial, mitigar el efecto de isla de calor y mejorar la gestión de agua pluvial (Castro-López et al., 2021; Pérez-Urrestarazu et al., 2015).

En el marco del programa Naturación de Azoteas, coordinado por las Secretarías de Salud (SEDESA) y del Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México, se han instalado techos verdes en doce hospitales capitalinos con una superficie combinada que supera los 18 840 m². El proyecto, impulsado por el jefe de Gobierno, Miguel Ángel Mancera, busca contribuir al combate de las emisiones de gases de efecto invernadero y promover entornos urbanos más saludables (Secretaría de Salud CDMX, 2016).

Desde su inicio en 2008, cuando comenzaron con 971 m² en el Hospital de Especialidades Dr. Belisario Domínguez en colaboración con la Universidad Autónoma de Chapingo, el programa ha expandido su alcance a otras instituciones. En 2013 se cubrieron con vegetación los hospitales generales Ajusco Medio (891.45 m²), Enrique Cabrera (2 490 m²) y Tláhuac (2 314 m²), y en 2015 se incorporó la Clínica-Hospital Emiliano Zapata (1 200 m²).

En una segunda etapa, iniciada ese mismo año, y con apoyo de la empresa EVISA, se añadieron techos verdes en el Hospital Pediátrico Villa (240.18 m²) y el Hospital Pediátrico Iztapalapa (1 100 m²), concluidos en marzo de 2016. También se sumaron 1 255 m² adicionales al Belisario Domínguez, 1 269 m² al Tláhuac, y proyectos en los hospitales Materno Infantil Cuauhtépec (306 m²), generales Milpa Alta (1 185 m²), Balbuena (2 921 m²), Villa (1 017 m²) y Rubén Leñero (1 681 m²) (Secretaría de Salud CDMX, 2016).

Por otro lado, México cuenta con el techo verde más grande de Latino América, un proyecto de 5,266 metros cuadrados en los que fue posible concentrar una extensa variedad de especies aptas al clima de CDMX, véase Figura 15. En esta cubierta se integran alrededor de 126 especies vegetales que abarcan desde flora endémica y hortalizas hasta familias como agaváceas, cactáceas y crasuláceas, además de plantas aromáticas, ornamentales y frutales. Aquí lo más importante es como se logró integrar diversidad de vegetación en un espacio que se puede transitar de forma peatonal.

Figura 15

La azotea más grande de América Latina, INFONAVIT CDMX



Nota. Retomada de mexicodesconocido, Un tesoro desconocido: la azotea verde del Infonavit, 2024, <https://acortar.link/qDHPm9>

Es de suma importancia recalcar que en México se ha tenido un avance considerable en la aplicación de techos verdes pues cuenta con varios proyectos en los que se han aplicado los techos verdes, desde hace algunos años, en edificaciones tanto del sector público como privado, esto es una muestra del interés que se tiene por adoptar la implementación y son un referente importante para contemplar la integración de estos en nuevos proyectos donde el diseño estructural sea el idóneo según el tipo que se quiera colocar, según información publicada en la Revista Tecnología en Marcha, se cuenta con techos verdes en diferentes edificaciones, véase Figura 16.

Figura 16*Algunos proyectos de techos verdes aplicados en México*

PROYECTO	UBICACIÓN	AÑO	ÁREA (m ²)
SECTOR PUBLICO			
Jardín Botánico CICEANA	Coyoacán, CDMX	1999	72
CENDI del Sistema de Transporte Colectivo	Cuauhtémoc, CDMX	2007	1,190
Glorieta del metro	Insurgentes Cuauhtémoc, CDMX	2007	1,037
Hospital de Especialidades Dr. Belisario Domínguez	Iztapalapa, CDMX	2008	975
Escuela Preparatoria Iztacalco "Felipe Carrillo Puerto"	Iztacalco, CDMX	2008	1,500
Escuela Preparatoria Coyoacán "Ricardo Flores Magón"	Coyoacán, CDMX	2008	2,225
Centro de Educación Ambiental "Yaultica"	Iztapalapa, CDMX	2008	1,500
Secundaria Técnica N°14 "Cinco de Mayo"	Benito Juárez, CDMX	2008	221
INFONAVIT	Álvaro Obregón, CDMX	2011	5,266
Museo de Historia Natural	Miguel Hidalgo, CDMX	2015	72
SECTOR PRIVADO			
Tienda de Autoservicio Superama Polanco	Miguel Hidalgo, CDMX	2008	5,014
Centro de Contacto Roberto González Barrera	Monterrey, Nuevo León	2013	1,750
Universidad Iberoamericana CDMX	Álvaro Obregón, CDMX	2019	1,350

Nota. Se ha tenido avance con los techos verdes en diferentes tipos de edificaciones en México, adaptada con información de la revista Tecnología en Marcha, 76 Vol. 33, N.º 3, p75, Julio-Setiembre 2020.

Es evidente que tanto en el sector público como privado a nivel nacional se han logrado significativos avances en cuanto a la colocación de techos verdes donde ha sido posible incluir diferentes especies de vegetación dependiendo las condiciones estructurales de las edificaciones en las que se han implementado.

Pasando con el tema de los techos verdes que se han construido a escala real en espacios educativos probablemente por la facilidad para hacer diferentes tipos de pruebas se retoman dos proyectos; el primero ubicado en la sala audiovisual de la Facultad de

Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán y el segundo en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas.

Para el primero describe que en edificaciones que utilizan el sistema de vigueta y bovedilla en Yucatán, México, se observó que los techos verdes lograron disminuir tanto los gradientes de temperatura en el espacio como en el tiempo, en comparación con los techos pintados de blanco. Hacia el final del experimento, los techos blancos mostraron un deterioro en la reflectividad (albedo), lo que generó variaciones térmicas notables en la estructura, mientras que los techos verdes continuaron operando eficazmente como mecanismo de atenuación.

Gracias a las imágenes termográficas, se pudo detectar fácilmente esta pérdida de capacidad reflectiva en los techos blancos, manifestada como gradientes espaciales de temperatura en su superficie inferior. Adicionalmente, el estudio ratificó el valor de emplear mediciones sin contacto como cámaras termográficas para registrar temperaturas superficiales en techos extensos que presentan diferencias térmicas distribuidas, ya que estos métodos facilitan una cobertura amplia y precisa durante la duración del experimento.

En términos de confort interior, las cartas psicrométricas revelaron que los espacios bajo techo verde presentaban condiciones más homogéneas en temperatura del aire comparados con los de techo blanco, aunque durante el verano en Mérida, Yucatán, ambos tipos de techos requirieron sistemas de ventilación mecánica para alcanzar niveles adecuados de confort térmico (Ordóñez López & Pérez Sánchez, 2015). El techo verde construido y usado fue en instalaciones de la Universidad, véase Figura 17.

Figura 17

Techo verde sala audiovisual 1 de la FIUADY



Nota. Retomada de Acta Universitaria, Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR, 2024, <https://acortar.link/rRQNYa>

Pasando al segundo proyecto retomado se trata de un proyecto del Doctor Gabriel Castañeda Nolasco desarrollado en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Chiapas, es un techo verde que se reactiva cada ciclo en época de lluvia, donde a raíz de la precipitación pluvial sobre el sustrato colocado, de forma natural reverdece la hierba pues la naturaleza cumple con su ciclo de vida, el espacio fue apto para hacer pruebas de mediciones de temperatura, con los datos recabados quedó evidenciado que se refresca el interior gracias al sistema instalado con materiales de bajo costo, véase Figura 18. en la cual se nota como la vegetación es nativa de la región y crece de forma natural, la imagen fue captura a finales de octubre del año 2024.

Figura 18

Techo verde UNACH



Nota. Techo Verde en las instalaciones de la Universidad Autónoma de Chiapas, imagen tomada durante la estancia académica, octubre 2024.

En síntesis, el estado de la práctica indica que los techos verdes constituyen una alternativa efectiva y sostenible para mejorar las condiciones térmicas interiores de edificaciones en zonas cálidas. No obstante, la implementación exitosa depende de una adecuada adaptación al contexto local y un diseño integral que considere aspectos técnicos, económicos y ambientales. En uno de los techos verdes de los dos con los que cuentan en la Facultad de Arquitectura de la UNACH fue posible revisar cómo funciona la capa drenante, la capa filtrante y como se desarrolla la vegetación que se reactiva con las lluvias.

A continuación, se abre el siguiente apartado; La revisión de casos de estudio, lo que permitirá profundizar en experiencias reales, identificando buenas prácticas y lecciones aprendidas que pueden orientar en las nuevas propuestas que se pueden aplicar con la finalidad de aplicar los aciertos y el tipo de mediciones que se pueden hacer para identificar nuevos productos dentro de los beneficios que nos generan los techos verdes.

1.7.3 Casos de Estudio

El análisis de casos de estudio proporciona evidencia empírica sobre la implementación y desempeño térmico de los techos verdes en distintas regiones del mundo. Estas experiencias permiten valorar su efectividad en condiciones reales, identificar variables de diseño relevantes y extraer lecciones que pueden ser útiles para su aplicación en contextos similares, como el de Culiacán, Sinaloa, caracterizado por un clima cálido seco con veranos extremos. A continuación, se presentan tres casos representativos:

Bagdad, Irak – Campo Experimental en Vivienda Unifamiliar (2023). En diciembre de 2023, Khalid y Ibraheem presentaron en la *International Conference on Engineering Sciences* un estudio de campo comparando una vivienda con techo verde (20 cm de sustrato y cobertura de césped, frente a una cubierta convencional en Bagdad. Los datos mostraron una reducción promedio de 5 °C en la temperatura interior durante el verano y una disminución del consumo energético para climatización de aproximadamente 45% (Khalid & Ibraheem, 2023).

Emiratos Árabes Unidos Modelado Energético y Microclima (2022) se realizó un estudio numérico sobre techos verdes y techos frescos en un clima desértico del Golfo. El análisis, centrado tanto en el edificio como en microclima urbano, arrojó: 10 % de reducción en carga de refrigeración con techo verde (7.5% con techo fresco). La temperatura de la superficie del techo se redujo desde 40.2 °C (convencional) hasta ~31.3 °C (verde). En verano, se logró una disminución del aire interior similar entre ambas tecnologías, aunque en invierno el techo fresco fue ~0.5 °C más eficiente (Elnabawi & Saber, 2022).

Caso Experimental en Mexicali (UACJ–UNAM, 2024) Un artículo publicado en *Ciencia Vital*: Techos con vegetación o techos verdes: una estrategia para alcanzar la comodidad térmica y ahorrar energía eléctrica, describe una vivienda monitorizada en Mexicali. Los autores documentan que el techo verde no solo redujo la temperatura interior acercándola al confort térmico, sino que también generó un ahorro significativo en consumo eléctrico para climatización (Salas et al., 2024).

Evaluación Térmica de un Techo Verde en Condiciones de Clima Seco del Noroeste Mexicano. Miguel Isaac Sahagun Valenzuela (2019), en su tesis doctoral de la UAM, evaluó módulos de techo verde con vegetación desértica en Hermosillo. Comparó un módulo con vegetación y sustrato de 16 cm (MFE-TV), uno con sustrato sin vegetación (MFE-TS), y un módulo testigo convencional (MFE-TC). El techo verde presentó una reducción máxima de hasta 9.9 °C en temperatura interior un 29.29% menor comparado con el ambiente y determinó que 0.16 m es el espesor óptimo del sustrato para este clima (Valenzuela, 2019).

Simulación con EnergyPlus en Clima Seco de Querétaro. Álvarez Narvárez et al. (2023) analizaron a través de simulaciones la influencia del espesor de sustrato en un techo verde extensivo. El modelo, basado en un caso de la UAQ, mostró que el sistema redujo la temperatura interior en aproximadamente 5 °C respecto al techo sin vegetación (Narvárez et al., 2023).

El análisis de casos de estudio reales internacionales como nacionales confirma que, los techos verdes representan una estrategia pasiva altamente efectiva para mitigar las altas temperaturas interiores en edificaciones ubicadas en zonas cálidas secas o áridas. A nivel internacional, experiencias como las de Bagdad y los Emiratos Árabes Unidos

refuerzan la aplicabilidad de techos verdes en condiciones extremas, con resultados consistentes en cuanto a la disminución de cargas térmicas, temperaturas superficiales y demanda energética. Estos estudios también muestran que variables como el espesor del sustrato, la selección de vegetación adaptada al clima local, y la integración con otras estrategias pasivas, son determinantes para maximizar el desempeño del sistema.

En contextos mexicanos como Mexicali, Hermosillo y Querétaro, se ha documentado empíricamente la capacidad de estos sistemas para reducir entre 5 y casi 10 °C la temperatura interior, mejorando el confort térmico y, en ciertos casos, generando importantes ahorros en el consumo energético por climatización. Se genera un resumen de los casos analizados, véase Tabla 11.

Tabla 11

Casos de estudio

Caso de estudio	Ubicación	Tipo de estudio	Reducción térmica (°C)	Ahorro energético	Observaciones clave
Salas et al. (2024)	Mexicali, México	Experimental in situ	Reducción significativa, valor no exacto publicado	Sí, ahorro medible en climatización	Mejoras en confort térmico y eficiencia energética
Valenzuela (2019)	Hermosillo, México	Experimental (tesis doctoral)	Hasta 9.9 °C (29.29%)	No cuantificado	Sustrato óptimo: 16 cm; vegetación desértica
Narváez et al. (2023)	Querétaro, México	Simulación (EnergyPlus)	-5 °C	No aplica	Evaluación de espesor de sustrato
Khalid y Ibraheem (2023)	Bagdad, Irak	Experimental en vivienda real	-5 °C	-45% de ahorro en energía	Techo verde con césped y 20 cm de sustrato
Elnabawi y Saber (2022)	Emiratos Árabes Unidos	Simulación energética y microclima	-8.9 °C en superficie	10% de reducción en carga térmica	Comparado con techos frescos; análisis urbano-ambiental

Nota. Evidencias de los casos de estudio analizados.

En conjunto, estos casos aportan una base sólida para validar el enfoque experimental de esta tesis y orientar el diseño, construcción y evaluación del techo verde implementado en la región de Culiacán, Sinaloa, bajo condiciones climáticas similares.

1.8 Conceptualización de las Variables

En este apartado se definen los conceptos técnicos clave que sustentan la presente investigación sobre techos verdes como estrategia de mitigación térmica pasiva. La definición y comprensión adecuada de estos términos permite establecer un lenguaje común y una base conceptual sólida para el desarrollo del proyecto experimental.

1.8.1 *Techo Verde*

El techo verde es un sistema constructivo aplicado en la parte superior de una edificación habitualmente una azotea que integra vegetación viva sobre un conjunto de capas técnicas especializadas, incluyendo sustratos, membranas impermeables, filtros, capas drenantes y elementos estructurales adecuados. Este sistema tiene como objetivo mejorar el comportamiento térmico del edificio, mitigar el efecto isla de calor, y generar beneficios ambientales y estéticos (Minke, 2004; Velasco et al., 2015).

Si bien la Real Academia Española (RAE) no define el término “techo verde” como unidad, sí ofrece las siguientes definiciones que lo componen:

Techo. Parte superior de un edificio, construcción, habitáculo, etc., que lo cubre y cierra (RAE, 2024).

Verde. Espacio destinado a ser parque o jardín, y que no se puede edificar; también, relacionado con productos o prácticas ecológicas y no perjudiciales para el medio ambiente (RAE, 2024).

El concepto de techo verde ha sido trabajado por diversos autores. Gernot Minke (2004) lo define como “una cubierta vegetal sobre un sistema multicapa diseñado para permitir el crecimiento de plantas, proteger la estructura, y regular el intercambio de calor y humedad”. De acuerdo con Santamouris (2012), su implementación contribuye al

confort térmico y al ahorro energético en climas cálidos, reduciendo la transferencia de calor al interior. Por lo cual es importante abordar ambos conceptos.

Techos Planos. Los techos planos son adecuados para sistemas extensivos e intensivos. No obstante, requieren atención especial en la capa drenante, debido a la posibilidad de acumulación de agua. Minke (2004) sugiere la incorporación de capas de sustrato separadas por geotextil para evitar saturación y favorecer el drenaje.

Techos Inclinados. Para pendientes mayores al 5%, no es necesaria una doble capa de sustrato. Es preferible colocar materiales porosos de mayor densidad en la parte baja para controlar el escurrimiento y evitar el deslizamiento del sustrato. La vegetación debe seleccionarse con base en el comportamiento hidrológico y de raíces (Sanabria, 2018).

En ambos casos la vegetación juega un papel de suma importancia ya que los pastos tienen un comportamiento diferente al que pueden provocar la hiervas u otras plantas. El grosor de la capa de sustrato debe ser contemplado para la selección del tipo de vegetación que se va a colocar, tomando en cuenta principalmente el tipo de raíz y cantidades de agua mínima requerida para mantenerse viva. El sistema de TV se compone de diferentes capas las cuales se describen a continuación:

Componentes del Techo Verde. El sistema de techo verde está conformado por diversas capas y materiales cuya disposición y elección dependen de factores como el clima local, la pendiente del techo, la carga estructural y el tipo de vegetación a instalar. A continuación, se describen los componentes esenciales del sistema.

SopORTE Base. El soporte estructural es el elemento que recibe toda la carga adicional del techo verde. En general, pueden utilizarse techos de concreto armado (losa

maciza), vigueta y bovedilla, techumbres metálicas o estructuras mixtas, siempre que cumplan con la resistencia estructural requerida. En techos planos se recomienda una pendiente mínima del 2% para permitir el drenaje pluvial (Minke, 2004). En México, el diseño estructural debe cumplir con las disposiciones del Reglamento de Construcciones local y las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), así como con las Normas Técnicas Complementarias, según corresponda.

Membranas. Las membranas forman la primera línea de protección del sistema. Deben evitar filtraciones y daños estructurales provocados por la humedad y las raíces de las plantas.

Impermeabilizante. Se aplica una membrana de poliuretano líquido en frío. La ventaja de utilizar este tipo de material se encuentra en la posibilidad de que la membrana no quede con uniones, ya que queda 100% adherida a la losa, conformando una unidad monolítica (Maldonado, 2008).

Capa de Amortiguamiento. Capa de cartón reciclado para cubrir erupciones que tiene la losa en la que se va a construir el techo verde, con lo cual se reduce la posibilidad de provocar daños a la capa de plástico negro que se va a colocar como anti-raíz.

Anti-raíz. Esta capa evita que las raíces perforen las capas inferiores, prolongando la vida útil del sistema (Minke, 2004). Esta se compone por capas de plástico, se recomienda polietileno de alta densidad, calibre 600, como barrera adicional contra la humedad, deben ser mínimo 2 capas de plástico, obteniendo un mejor resultado si son más la cantidad de capas implementadas, puesto que se aumenta la barrera para las raíces.

Capa Drenante. Su función es evacuar el exceso de agua por lluvia o bien por riego, en este caso el material aplicado para esta capa permite retener parte del agua la

cual es aprovechada por la vegetación en periodos secos. Se recomienda el uso de materiales porosos y livianos como perlita, arcilla expandida, piedra pómez o materiales reciclados (Minke, 2012). En techos con pendiente, esta capa puede reducirse o integrarse al sustrato (Sanabria, 2018).

Capa Filtrante. Consiste en un geotextil que evita que el sustrato migre hacia la capa drenante. Puede incluir placas de poliestireno con canaletas que permiten retención temporal de agua para las raíces (Maldonado, 2008). También se pueden usar materiales de menor costo; como el fieltro comercial, que cumplen la función de retener el limo del sustrato y alarga la vida útil del proyecto.

Capa de Sustrato. El sustrato debe tener propiedades físicas y químicas adecuadas: retención de humedad, porosidad, permeabilidad, capacidad de intercambio de nutrientes y estabilidad mecánica. Su espesor varía según el tipo de techo: extensivo (6–15 cm), semi-intensivo (15–30 cm), intensivo (>30 cm) (Velasco et al., 2015).

Capa de Vegetación. La vegetación debe seleccionarse según criterios de adaptabilidad al clima, tipo de raíz, requerimientos hídricos y comportamiento fenológico. Las especies con raíces poco invasivas, alta resistencia a sequía y bajo mantenimiento son ideales en climas cálidos (Minke, 2004; Santamouris, 2012).

En conclusión, el techo verde constituye la variable independiente de esta investigación, al configurarse como un sistema constructivo que modifica las condiciones de transferencia de calor en la cubierta, pues funciona como una capa que no permite la incidencia solar directa sobre los techos en este caso de concreto armado. Su desempeño puede evaluarse a través de los efectos directos que genera en los ambientes interiores,

particularmente la disminución de la temperatura, aspecto que se desarrolla en el siguiente apartado.

1.8.2 Reducción de Temperatura

En el contexto de esta investigación, la reducción de temperatura se entiende como la disminución de calor sensible en el interior de un espacio construido, consecuencia directa de la implementación de estrategias pasivas como los techos verdes. Este fenómeno se produce mediante la modificación del balance térmico en el edificio, afectando principalmente la transferencia de calor por radiación solar, conducción y convección.

Desde el enfoque de eficiencia energética y diseño pasivo, la reducción de temperatura es una variable cuantificable mediante medición de condiciones térmicas en espacios interiores, bajo condiciones comparables. En esta investigación, se registra experimentalmente mediante sensores de temperatura en dos espacios idénticos, uno con techo verde y otro con techo convencional, en un clima cálido seco.

Autores como Santamouris (2012) y Minke (2004) han documentado que la implementación de techos verdes puede reducir la temperatura interior de una edificación entre 2 y 10 °C, dependiendo de variables como el tipo de vegetación, espesor del sustrato, orientación solar, y características constructivas. Esta disminución térmica mejora el confort interior, reduce el uso de sistemas mecánicos de climatización, y aporta a la mitigación del efecto isla de calor urbano, fenómeno ampliamente estudiado en zonas urbanas de alta densidad.

La reducción de temperatura también se puede interpretar como un indicador indirecto de eficiencia térmica, vinculado al comportamiento de materiales con alta

capacidad de aislamiento y al microclima generado por la evapotranspiración de la vegetación. Ahora bien, pasamos al siguiente concepto el cual se relaciona con el tema que se pretende atender.

Transferencia de Calor. La transferencia de calor en techos de concreto armado particularmente en climas cálidos y con alta radiación solar, es un proceso físico crucial para comprender el comportamiento térmico de una edificación, cabe destacar que la transferencia se da por todos los elementos que envuelven un espacio como; muros, ventanas, puertas. Dicha transferencia se produce por tres mecanismos complementarios:

Conducción. que implica el paso del calor a través del material estructural (en este caso, la losa de concreto armado) pero también se da por el resto de los elementos de la envolvente del espacio.

Convección. que ocurre por el intercambio de calor entre la superficie del techo y el aire circundante.

Radiación. que representa la emisión y absorción de energía térmica proveniente del sol y del entorno.

En el caso específico de la radiación solar, esta constituye la fuente predominante de ganancia térmica en los techos de concreto armado expuestos. La superficie del techo absorbe energía de onda corta durante las horas de insolación, la cual se convierte en calor sensible que se transmite gradualmente hacia el interior del edificio. En techos convencionales de concreto armado sin aislamiento, este efecto puede elevar considerablemente la temperatura interior, incluso varias horas después de la exposición solar, debido a la alta inercia térmica del material (Srinivasan & Ravikumar, 2014).

La implementación de techos verdes introduce una capa adicional que actúa como barrera térmica natural: el sustrato y la vegetación reducen la absorción de radiación solar directa y fomentan la disipación del calor mediante procesos de evapotranspiración. Esto disminuye significativamente la temperatura superficial del techo y, por ende, la transferencia de calor por radiación y conducción hacia los espacios interiores. De esta manera, los techos verdes no solo moderan la temperatura interior, sino que también contribuyen a estabilizar el microclima circundante, reduciendo el flujo de energía térmica al ambiente urbano.

En síntesis, la reducción de temperatura interior es una consecuencia directa del control de los mecanismos de transferencia de calor, especialmente la radiación solar, lograda mediante el diseño y aplicación de soluciones pasivas como los techos verdes. Este entendimiento físico es fundamental para evaluar su desempeño térmico y energético en edificaciones ubicadas en zonas cálidas.

Comprender el comportamiento térmico de los techos verdes permite establecer criterios técnicos y de diseño acordes con su desempeño real. Sin embargo, la implementación de estas estrategias pasivas no depende únicamente del conocimiento científico, sino también del marco normativo y regulatorio que las respalda. Por ello, en el siguiente apartado se presenta una revisión de la normatividad aplicable a los techos verdes, abordando su evolución y alcances en el contexto internacional, nacional y local, con el propósito de identificar las directrices que orientan su aplicación en el ámbito de la edificación sustentable.

1.9 Normatividad

La implementación de techos verdes en contextos urbanos, especialmente en regiones con clima cálido, no solo exige una comprensión técnica de sus componentes y

beneficios, sino también un conocimiento claro del marco normativo que regula su diseño, construcción y mantenimiento. Este marco legal es indispensable para garantizar que las soluciones propuestas no comprometan la integridad estructural de las edificaciones, ni el cumplimiento de los lineamientos ambientales y de desarrollo urbano establecidos por las autoridades competentes.

En este sentido, los techos verdes se encuentran en la intersección de distintas esferas normativas: por un lado, las normas internacionales que definen estándares técnicos y constructivos; por otro, las regulaciones nacionales y locales que abordan el derecho al medio ambiente sano, la edificación sustentable y la planeación urbana. Con base en ello, es esencial que cualquier proyecto que contemple la instalación de un techo verde evalúe e integre estos marcos regulatorios desde la etapa de planeación, a fin de asegurar su viabilidad y permanencia.

Tal como lo señala Álvarez (2020), “el cumplimiento normativo en materia ambiental y urbana no solo es un requisito administrativo, sino una condición esencial para la legitimación social y técnica de las estrategias de infraestructura verde en las ciudades mexicanas” (p. 45). Por lo tanto, el análisis normativo no debe ser visto como un trámite, sino como una parte integral del diseño sostenible.

El marco normativo que regula el uso de techos verdes y otras estrategias de infraestructura sustentable constituye un elemento fundamental para su implementación efectiva. Dichas regulaciones establecen los criterios técnicos, ambientales y administrativos necesarios para garantizar la seguridad estructural, la eficiencia energética y la contribución ecológica de los sistemas vegetados en cubiertas. A

continuación, se presenta un análisis de los principales lineamientos a nivel internacional, nacional y local que orientan su aplicación.

1.9.1 Normativa Internacional

A nivel global, las normas y guías técnicas más relevantes incluyen:

- a) ASTM E2777 *Guide for Vegetative (Green) Roof Systems*, que establece criterios sobre capas, drenaje, impermeabilización, carga estructural, selección vegetal y mantenimiento para sistemas intensivos o extensivos de pendientes de hasta 15 %.
- b) ASTM D8014 *Guide for Selection of Membranes Used in Vegetative Roofing Systems*, enfocado en la selección adecuada de membranas según condiciones y manejo hídrico.
- c) Otras normas complementarias como E2396, E2397, E2398, E2399, E2400 y E2788, enfocadas en propiedades del sustrato, densidad, retención de agua, resistencia al viento y barreras de raíces.
- d) Código modelo *International Green Construction Code (IgCC)*, que incluye disposiciones voluntarias para fomentar soluciones verdes, como techos vegetados, así como aspectos de eficiencia energética, manejo de agua y criterios ambientales en edificaciones nuevas.

Asimismo, las Guías FLL (Sociedad de Investigación para el Desarrollo del Paisaje y la Construcción del Paisaje, 2018), representan el estándar técnico más reconocido en Europa, proporcionando especificaciones detalladas para el diseño, instalación y mantenimiento de techos verdes. Estas guías han sido adoptadas como modelo en países como Alemania, Suiza y Austria, y sirven de referencia para la elaboración de normativas locales en otras regiones del mundo.

1.9.2 Normativa Nacional (México)

En México, la normatividad relacionada con la edificación sustentable y la infraestructura verde ha avanzado de manera gradual, incorporando criterios técnicos y ambientales en los instrumentos legales:

- a) NMX-AA-164-SCFI-2013 Edificación sustentable, que define criterios para edificaciones verdes e incluye la definición de "azotea verde naturada", especificando requisitos mínimos ambientales.
- b) Artículo 4º Constitucional, que garantiza el derecho a un medio ambiente sano (Gaceta, 2017).
- c) Creación del INECC (2012), como órgano técnico para desarrollar políticas climáticas, ambientales y de sustentabilidad., (Gaceta, 2017)
- d) NADF-013-RNAT-2007 (Ciudad de México), que define técnicamente a los sistemas de naturación, indicando componentes constructivos y funcionales (GODF, 2008).

A estos lineamientos se suma la Estrategia Nacional de Infraestructura Verde (SEMARNAT, 2020), que promueve la integración de cubiertas y muros vegetales como medidas de adaptación al cambio climático y herramientas de gestión ambiental urbana. Este documento oficial respalda la incorporación de los techos verdes en proyectos de urbanismo sostenible, fortaleciendo su relevancia dentro de la política ambiental mexicana.

Si bien el marco normativo nacional sienta las bases para la edificación sustentable en México, especialmente a través de la NMX-AA-164-SCFI-2013 y la NADF-013-RNAT-2007, la implementación práctica de techos verdes depende en gran

medida de su adaptación a los marcos regionales y municipales. En muchos casos, los lineamientos federales se quedan en el nivel conceptual, sin mecanismos locales que los traduzcan en disposiciones concretas. Por ello, resulta necesario analizar la situación en entidades como Sinaloa y el municipio de Culiacán, donde la regulación ambiental y de construcción ofrece un punto de partida favorable, aunque todavía sin directrices específicas sobre naturación de azoteas.

1.9.3 Normativa Regional y Local

En Sinaloa y particularmente en Culiacán, el marco regulatorio presenta avances en materia ambiental y urbana, aunque aún carece de normativas explícitas sobre techos verdes, pero se pueden tomar en cuenta otras normativas relacionadas con los aspectos a considerar cuando se habla del tema. Entre los instrumentos aplicables se encuentran:

- a) El Reglamento de Ecología y Protección al Ambiente del Municipio de Culiacán, que establece las bases para la conservación ambiental y el desarrollo sustentable. Si bien no menciona los techos verdes de forma específica, sí genera un contexto propicio para la promoción de proyectos ecológicos urbanos.
- b) El Reglamento de Construcciones del Municipio de Culiacán, que contempla las cargas estructurales, materiales y garantías técnicas necesarias para nuevas edificaciones, aplicables a sistemas de techos verdes siempre que cumplan con las condiciones de seguridad estructural.
- c) El Reglamento de Ecología Municipal, que promueve la ejecución de proyectos sustentables y la posibilidad de otorgar incentivos ambientales a desarrollos privados o públicos con componentes ecológicos.

La articulación entre los marcos nacionales y locales resulta esencial para consolidar la aplicación de techos verdes como estrategia ambiental y urbana. Aunque los reglamentos municipales aún no incorporan disposiciones específicas sobre naturación de azoteas, sí establecen los fundamentos técnicos y administrativos para su integración futura. En este sentido, la generación de evidencia científica local, como la desarrollada en la presente investigación, constituye un aporte relevante para respaldar la actualización normativa y fortalecer la planeación urbana sostenible en regiones de clima cálido.

El análisis normativo realizado permite comprender la complejidad y el alcance de los marcos legales que inciden sobre la implementación de techos verdes en México. Desde los estándares internacionales hasta las regulaciones municipales, es evidente que cualquier propuesta de infraestructura verde debe articularse con los principios de sustentabilidad, seguridad estructural y legalidad ambiental.

En este contexto, la presente investigación se inserta estratégicamente, no solo para evaluar el desempeño térmico de un techo verde en clima cálido seco, sino también para generar evidencia empírica que sustente la futura incorporación de lineamientos normativos locales en materia de infraestructura verde. A partir de este marco jurídico de referencia, se desarrolla la propuesta metodológica que combina un enfoque experimental y comparativo, descrita en el siguiente capítulo.

Capítulo II

Metodología

Diseño Experimental para la Evaluación Térmica del Techo Verde en Clima Cálido Seco, Culiacán Rosales, Sinaloa.

A partir del marco teórico y normativo previamente desarrollado, en este capítulo se describe la estrategia metodológica implementada para medir, comparar y evaluar el comportamiento térmico de un espacio con techo verde respecto a uno sin él, bajo condiciones reales de clima cálido seco.

El incremento de las temperaturas en las zonas urbanas, consecuencia de la urbanización acelerada y el cambio climático, ha generado problemas significativos de confort térmico en las edificaciones. En regiones cálidas, la transferencia de calor a través de la cubierta representa un factor crucial en la sensación térmica interior. En este contexto, la exploración de soluciones pasivas sostenibles y efectivas, como los techos verdes, cobra especial relevancia.

Los techos verdes, definidos como sistemas constructivos que incorporan vegetación sobre los techos, permiten mejorar el aislamiento térmico y reducir la temperatura interior de los espacios. Sin embargo, su desempeño en climas cálidos requiere una evaluación experimental específica que permita determinar su eficacia real en condiciones de escala y ambiente natural. En la Tabla 12 se presentan los elementos principales del diseño experimental y los parámetros evaluados en la investigación.

Tabla 12*Metodología de la investigación*

Diseño de Investigación		
Objetivo: Medir y analizar el impacto de la implementación de un techo verde como estrategia pasiva para la reducción de la temperatura interior en una edificación con losa de concreto armado ubicada en una región de clima cálido, considerando la transferencia de calor a través del techo como variable clave en el desempeño térmico del sistema.	Parámetros: Diferencias de temperaturas superficiales al interior de las losas de concreto armado con y sin techo verde, así como la temperatura y humedad relativa al interior de los espacios.	Método: Monitoreo de Temperatura superficial interior de losas, temperatura y humedad relativa interior, radiación solar, temperatura y humedad relativa ambiente.
Experimental		
Componentes del techo verde	Condiciones físicas del espacio experimental	Selección de vegetación
Monitoreo		
Normas ASTM, que en español significa Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales	Criterio de selección de instrumentos	Puntos de monitoreo interiores y exteriores
Análisis comparativo		
Selección de periodo	Periodo de transición	Periodo cálido por día
Conclusiones		

Nota. La tabla resume los elementos principales del diseño experimental y los parámetros evaluados en el estudio.

2.1 Enfoque y Diseño de la Investigación

La investigación adopta un enfoque Cuasiexperimental comparativo con un diseño de escala 1:1. El objetivo central es; Medir y Analizar, el impacto de la implementación de un techo verde como estrategia pasiva para la reducción de la temperatura interior en una edificación ubicada en una región de clima cálido, considerando la transferencia de calor a través del techo como variable clave en el desempeño térmico del sistema.

Para ello, se seleccionaron dos aulas con características físicas y dimensiones equivalentes en la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Sinaloa las

cuales se describen en el capítulo IV. Una de ellas fue intervenida con la instalación de un techo verde semi-intensivo, mientras que la otra permaneció con su losa de concreto original, funcionando como espacio de control para las mediciones comparativas.

2.2 Propuesta Metodológica

El método adoptado en esta investigación combina un enfoque cuantitativo y cuasiexperimental, orientado a la medición objetiva del comportamiento térmico de los techos verdes, con un componente cualitativo que permite interpretar los resultados en relación con el contexto ambiental y urbano. Este enfoque integral facilita una comprensión más amplia del fenómeno térmico, considerando tanto los datos empíricos como las condiciones locales que influyen en el desempeño del sistema. El procedimiento metodológico se estructuró en tres fases principales: diseño experimental, monitoreo ambiental y análisis comparativo.

2.2.1 Diseño Experimental

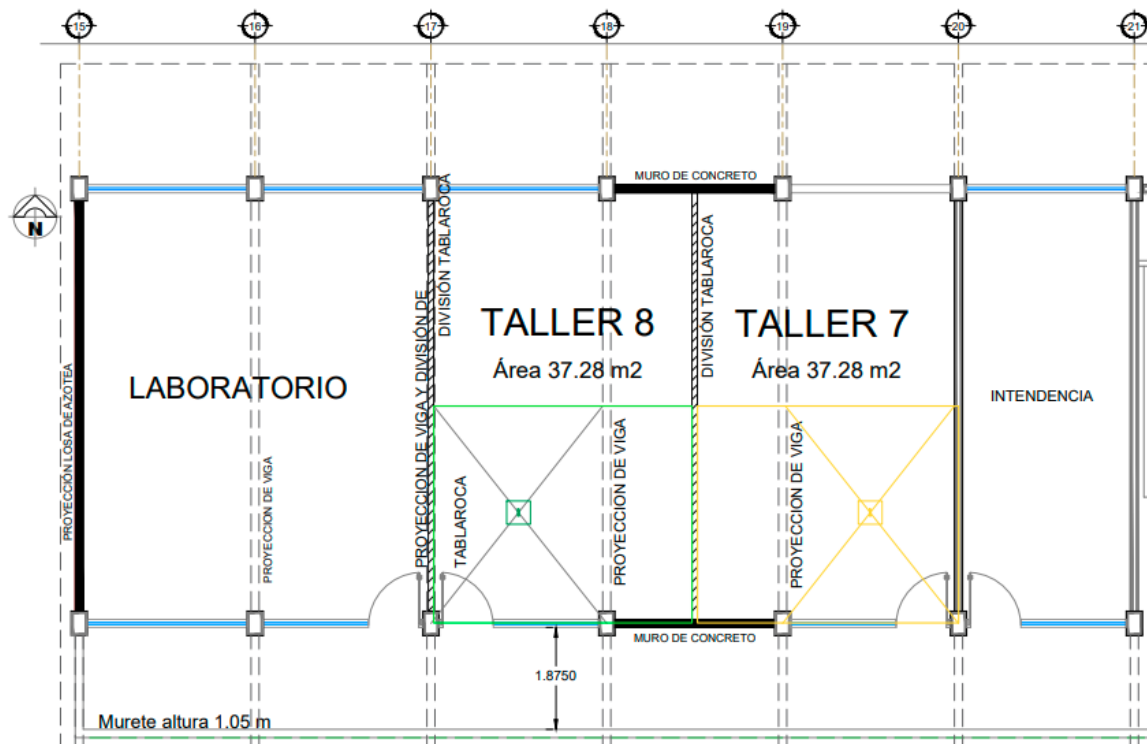
El diseño experimental consistió en la construcción y monitoreo de un techo verde semi-intensivo bajo condiciones reales de exposición, instalado sobre un módulo de la FAUAS representativo del tipo de edificación común en zonas. Se empleó un sistema compuesto por capas de impermeabilización, drenaje, sustrato y vegetación seleccionada por su resistencia térmica e hídrica. Paralelamente, tomo en cuenta un módulo semejante con techo de concreto armado, utilizado como referencia o testigo. Ambos módulos presentan las mismas dimensiones, orientación y materiales de cerramiento, garantizando condiciones de comparación homogéneas. Esta configuración experimental permite aislar el efecto térmico atribuible exclusivamente al techo verde, asegurando la validez de los resultados obtenidos.

2.2.2 Monitoreo Ambiental

El monitoreo, entendido como el proceso sistemático de medición y registro continuo de variables ambientales para analizar su comportamiento en el tiempo, se efectuó mediante registradores automáticos de datos tipo HOBO. Estos fueron colocados estratégicamente para medir la temperatura superficial interior de las losas en los talleres, en el ocho se construyó el techo verde, el taller siete se usó de testigo, así como la temperatura y la humedad relativa interior de cada módulo, véase Figura 19. Los sensores se configuraron con intervalos de registro de 1 hora, lo que permitió obtener un seguimiento detallado del comportamiento térmico diario.

Figura 19

Ubicación de instrumentos registradores de temperaturas y humedad relativa



Nota. Las sondas para el registro de la temperatura superficial de las losas se ubicaron en centro geométrico tomando en cuenta espacio entre vigas y área correspondiente a la cantidad de losa cubierta con techo verde.

Adicionalmente, se incorporaron datos de temperatura ambiente y radiación solar provenientes de la estación climatológica de la UAS, lo que permitió correlacionar las condiciones atmosféricas externas con las variaciones térmicas interiores. Este monitoreo simultáneo posibilita analizar la respuesta térmica de ambos sistemas frente a condiciones climáticas reales.

En este estudio, las variables ambientales monitoreadas fueron:

- a) Temperatura superficial interior de las losas (medida con registradores tipo HOBO).
- b) Temperatura interior de cada módulo.
- c) Humedad relativa interior de cada módulo.
- d) Temperatura ambiente exterior, obtenida de la estación climatológica de la UAS.
- e) Radiación solar, también proporcionada por la estación climatológica.

Una vez que se contó con el registro de la información previamente mencionada, se generó un archivo de Excel en el que se concentraron los datos de los registradores HOBO colocados, así como la información proporcionada por la estación climatológica de la UAS. Con ello fue posible realizar el cruce de información y determinar los días necesarios para elaborar los gráficos que permitieran explicar el análisis comparativo y evidenciar los resultados obtenidos.

2.2.3 Análisis Comparativo

El análisis comparativo se basó en la evaluación gráfica de las diferencias de temperatura entre los dos módulos, considerando periodos representativos de días de transición entre el 21 de marzo y 21 de abril de año 2025. A partir de los registros obtenidos, se determinaron los valores medios, máximos y mínimos de temperatura interior, así como las variaciones diarias de humedad relativa. La comparación entre el

módulo con (TV) y sin techo verde (STV). Este procedimiento proporciona evidencia empírica sólida para validar el comportamiento térmico del techo verde en condiciones reales de uso.

2.3 Componentes Experimentales

La instalación del sistema de techo verde se desarrolló considerando los elementos constructivos necesarios para garantizar su funcionamiento adecuado en un clima cálido, así como para permitir la evaluación comparativa del desempeño térmico. El sistema implementado corresponde a un techo verde semi intensivo de carácter multicapa, integrado por los componentes esenciales para asegurar la impermeabilidad, el drenaje y el soporte de la vegetación.

En primer lugar, sobre la losa existente se colocó una membrana impermeabilizante, cuya función es evitar la infiltración de humedad hacia la estructura. Posteriormente, se instaló una barrera anti-raíz, destinada a impedir el crecimiento y penetración del sistema radicular hacia las capas inferiores. Encima de esta se incorporó una capa drenante, responsable de favorecer la evacuación del exceso de agua y de mantener condiciones adecuadas de humedad en el sustrato. Esta capa se complementó con una tela filtrante, diseñada para evitar que las partículas finas del sustrato obstruyan el drenaje.

El sustrato utilizado estuvo compuesto por materiales ligeros y con buena capacidad de retención de humedad, seleccionados para reducir cargas sobre la losa y al mismo tiempo proporcionar las condiciones necesarias para el desarrollo vegetal. Finalmente, se estableció una cobertura vegetal integrada por especies adaptadas a un clima cálido semi seco, lo que contribuye a minimizar el estrés hídrico y mejorar la estabilidad del sistema durante el periodo de experimentación.

El módulo experimental corresponde a un espacio con una superficie aproximada de 37 m² de losa de concreto armado, de los cuales por cuestión del trabajo y costo solo la mitad de la losa fue cubierta con el sistema de techo verde, mientras que la otra mitad se dejó libre. Se considero un aula más en igualdad de condiciones para usar como testigo, esta configuración permite realizar una comparación directa entre ambas superficies, bajo las mismas condiciones de radiación, clima y orientación, fortaleciendo así el análisis del comportamiento térmico.

2.4 Instrumentación y Procedimiento

Se emplearon sensores de alta precisión para medir los principales parámetros térmicos y ambientales. Las variables consideradas incluyen:

- a) Temperatura superficial interior de la losa T_s (°C)
- b) Temperatura Bulbo Seco TBS (°C) y Humedad Relativa del espacio interior RH (%).
- c) Variables climáticas externas, incluyendo radiación solar, mediante estación climatológica ubicada en la UAS (coordenadas: 24°49'38.6" N, 107°22'48.95" O; altitud: 68.797 m.s.n.m.).

2.5 Técnicas de Análisis

Los datos cuantitativos recopilados se analizarán mediante técnicas estadísticas descriptivas y comparativas, con el objetivo de identificar diferencias significativas en el comportamiento térmico de ambos espacios; con y sin TV. Además, la información se representó gráficamente para visualizar los patrones de variación a lo largo del tiempo. Se complementó este análisis con información documental de estudios previos, lo que permitió contrastar los resultados obtenidos con evidencia existente y fortalecer la interpretación general del desempeño térmico.

2.6 Justificación del Enfoque Cuasiexperimental

El presente estudio adopta un enfoque cuasiexperimental, debido a que la intervención —la instalación de un techo verde— se lleva a cabo en un entorno real de uso académico, donde no es posible asignar aleatoriamente los espacios que conforman los grupos de comparación. En este diseño, característico de investigaciones aplicadas, se trabaja con un aula intervenida (grupo experimental) y un aula de características similares sin intervención (grupo de control), lo que permite evaluar el efecto de la variable independiente sin necesidad de modificar la distribución natural de los espacios. Este tipo de diseño es adecuado cuando las unidades de análisis ya existen antes del estudio y no pueden reorganizarse al azar, pero sí pueden ser observadas sistemáticamente bajo condiciones comparables (Ramos Galarza, 2021).

La lógica del enfoque cuasiexperimental consiste en comparar grupos no equivalentes, pero similares en sus condiciones arquitectónicas, climáticas y de uso, con el fin de identificar cambios atribuibles a la intervención implementada. En esta investigación, la presencia del techo verde constituye la variable independiente, mientras que la temperatura superficial de la losa, la temperatura interior del aula y la humedad relativa corresponden a las variables dependientes, registradas mediante sensores HOBO. Esta estructura metodológica permite explorar relaciones de causa–efecto con un nivel de control adecuado, aun sin cumplir con la asignación aleatoria, lo cual es coherente con estudios de campo en edificaciones reales (Guevara Alban et al., 2020).

El uso de un diseño cuasiexperimental resulta particularmente pertinente para investigaciones en arquitectura bioclimática y eficiencia térmica, donde las intervenciones deben evaluarse en condiciones reales de operación. Estudios previos en techos verdes han empleado metodologías comparativas similares, demostrando

reducciones significativas en la temperatura interior y en la amplitud térmica diaria cuando se utiliza un módulo experimental frente a un módulo testigo (Cuevas Acuña et al., 2024).

Por tanto, la aplicación de este enfoque metodológico no solo fortalece la validez interna del estudio al permitir la evaluación directa del efecto térmico del techo verde, sino que también incrementa la validez externa, al generar resultados aplicables a edificaciones reales en regiones con clima cálido semiseco como la ciudad de Culiacán Rosales.

2.7 Justificación de Indicadores

La selección de indicadores térmicos y ambientales responde a la necesidad de representar con precisión los procesos de transferencia de calor y su impacto en el confort interior. Estos parámetros fueron elegidos por su capacidad de evidenciar el desempeño pasivo entre la losa con y sin TV, permitiendo una evaluación integral del sistema. Se definieron cuatro indicadores principales, cada uno orientado a una dimensión específica del comportamiento térmico:

2.7.1 Temperatura Superficial Interior del Techo de Concreto Armado

La temperatura en la superficie interior del techo de concreto armado constituye la primera etapa del flujo de calor hacia el espacio habitable. Medirla permite cuantificar la capacidad del techo verde para atenuar la radiación solar incidente y reducir la carga térmica que se transmite al interior (Ascione et al., 2013). Este indicador es esencial para evaluar la eficacia del sistema como barrera térmica natural y su potencial en la reducción de la temperatura al interior.

2.7.2 Temperatura Ambiente Interior

El confort térmico de los ocupantes depende principalmente de la temperatura del aire interior. La comparación entre los espacios con y sin techo verde permite determinar el beneficio directo de la estrategia pasiva en condiciones de uso real. Este parámetro refleja la influencia conjunta de la radiación, la conducción y la convección, y ofrece un vínculo claro entre el comportamiento físico del material y la percepción térmica del usuario (Berardi, 2016).

2.7.3 Humedad Relativa (RH) Interior

La humedad relativa desempeña un papel determinante en la percepción térmica y el bienestar de los ocupantes. La vegetación y el sustrato de los techos verdes modifican el microclima inmediato mediante procesos de evapotranspiración, lo que puede generar un enfriamiento adicional del aire y mejorar la sensación térmica (Susca et al., 2011).

2.7.4 Radiación Solar Incidente

El registro de la radiación solar incidente es fundamental para contextualizar las cargas térmicas que actúan sobre la losa y normalizar las comparaciones entre periodos de medición. Este parámetro permite relacionar la magnitud de la energía solar con las variaciones observadas en la temperatura superficial e interior, proporcionando una base objetiva para la interpretación de resultados (Oke, 1982).

Cada uno de estos indicadores ofrece una perspectiva complementaria del desempeño térmico del techo verde:

- a) La temperatura superficial revela la eficacia aislante de la cubierta.
- b) La temperatura y humedad interior indican el impacto en el confort humano.

- c) La radiación solar ayuda a interpretar variaciones causadas por condiciones meteorológicas.

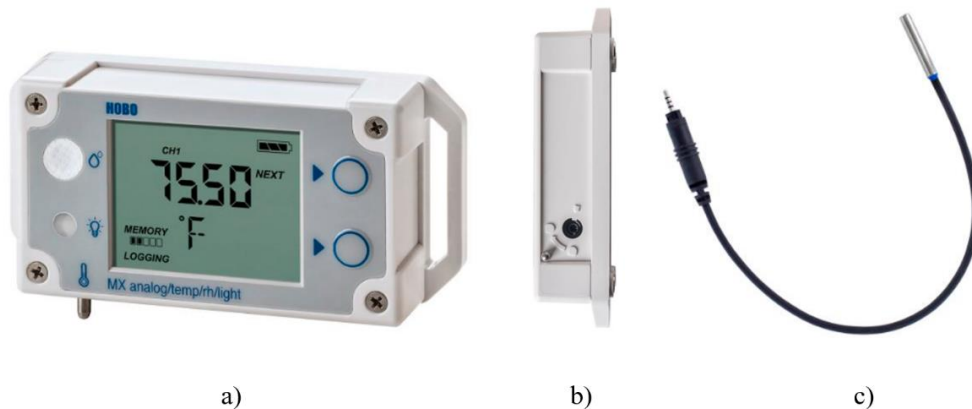
La integración de estos parámetros genera evidencia que sirve como un diagnóstico térmico completo, que sustenta tanto el análisis estadístico como la formulación de recomendaciones de diseño pasivo donde los techos verdes deben ser considerados para edificaciones en climas cálidos, principalmente por los múltiples beneficios que generan.

2.8 Diseño y Validación de Instrumentos

El proceso de selección, descripción y validación de los instrumentos empleados en esta investigación aseguró la confiabilidad de los datos obtenidos. Los criterios técnicos establecidos permitieron garantizar que los equipos cumplieran con los estándares internacionales de precisión y operatividad. Asimismo, la descripción detallada de cada dispositivo evidencia su pertinencia para medir de manera específica las variables de interés en el estudio comparativo entre techo verde y techo convencional.

Finalmente, las pruebas y verificación de conectividad confirmaron que los sensores mantenían un desempeño estable en condiciones reales de uso, asegurando la continuidad del registro sin pérdida de información.

En conjunto, estas acciones fortalecen la validez interna de la investigación, al garantizar que las mediciones recolectadas reflejen de forma fiel el comportamiento térmico de ambos sistemas constructivos, constituyendo una base sólida para el análisis comparativo posterior. Se definieron criterios de precisión, operatividad y conformidad normativa para la selección y validación de los instrumentos de monitoreo que se colocaron para el registro de información, véase Figura 20.

Figura 20*Registrador de datos analógico HOBO*

Nota. Dispositivos usados para el registro de temperatura y humedad interior, así como la temperatura superficial interior de las losas (ambos espacios usados) de concreto con techo verde y techo convencional (losas de concreto armado):

- a) HOBO MX1104 con entrada analógica externa para conectar sonda
- b) Vista lateral donde se conecta la sonda
- c) Sonda SD-TEMP-06 (Onset, s. f.).

2.8.1 Criterios de Selección

La elección de los instrumentos de medición respondió a un proceso riguroso orientado a garantizar la calidad de los datos y su compatibilidad con estándares internacionales de monitoreo ambiental. Se establecieron criterios técnicos y operativos que permitieran asegurar precisión, confiabilidad y facilidad de uso en condiciones reales de un experimento a escala 1:1. Dichos criterios se sintetizan en tres ejes principales:

Precisión y Rango de Medición. Temperatura: Error máximo de $\pm 0,20$ °C en un rango operativo de -20 °C a 70 °C, con resolución de $0,002$ °C a 25 °C y deriva anual $< 0,1$ °C (Onset, s. f.). Humedad relativa: Exactitud típica de $\pm 2,5$ % en 10 %– 90 % HR; resolución de $0,01$ % y deriva anual < 1 % (Onset, s. f.). Estos parámetros superan los requisitos establecidos en las normas sobre confort térmico (ANSI/ASHRAE 55-2010; ISO 7726:1998) y en la guía de monitoreo in situ ASTM C1046-95.

Facilidad de Uso y Recolección de Datos. Los registradores HOBO MX-1104 permiten comunicación Bluetooth, descarga inalámbrica por medio de una aplicación desde un teléfono móvil de gama media en adelante, solo con estar cerca de los registradores se puede hacer la descarga de información la cantidad de veces que sea necesario, cada vez que se hace una descarga es con la cantidad de datos acumulados, tienen una capacidad de almacenamiento de hasta 1,9 millones de datos, lo que facilita implementaciones prolongadas sin interrupciones (Onset, s. f.). para estos análisis se configuro a que se haga un registro cada hora.

Compatibilidad Normativa. La selección de variables e instrumentos se realizó con base en normas internacionales de confort y monitoreo:

- a. ANSI/ASHRAE 55-2010 (confort térmico en ocupantes)
- b. ISO 7730:2005 (evaluación del confort térmico)
- c. ISO 7726:1998 (instrumentos de medición)
- d. ISO 10551:1995 (Índice de confort térmico)
- e. ASTM C1046-95 (guía para medición in situ).

2.8.2 Descripción de los Instrumentos

Para llevar a cabo el monitoreo comparativo entre dos losas de concreto armado una con y otra sin techos verde, fue necesario utilizar instrumentos capaces de garantizar mediciones precisas, confiables y continuas. La selección se orientó hacia equipos especializados en el registro ambiental, particularmente en variables de temperatura y humedad, así como en radiación solar. Se detallan los dispositivos utilizados y sus especificaciones técnicas principales, véase Tabla 13.

Tabla 13*Instrumentos de medición empleados*

Variable	Instrumento	Especificaciones clave
Temperatura superficial interior de losa	HOBO MX-1104 + sonda SD-TEMP-06	Rango -20 °C a 70 °C ; $\pm 0,20\text{ °C}$; resolución $0,002\text{ °C}$; deriva $< 0,1\text{ °C/año}$. Sonda de contacto para transferencia de calor.
Temperatura y humedad relativa Interior espacios	HOBO MX-1104	Bluetooth; $\pm 2,5\%$ HR; resolución $0,01\%$ HR; almacenamiento $1,9\text{ M}$ lecturas; alarmas visuales/auditivas.
Temperatura, Humedad Ambiente y Radiación solar	Estación Climatológica UAS	Datos cada hora; coordenadas $24^{\circ}49'38,6''\text{ N}$, $107^{\circ}22'48,95''\text{ O}$; altitud $68,8\text{ m s. n. m.}$ (UAS, 2024).

Nota. Información retomada de la página oficial de HOBO y de los informes de la Estación Climatológica de la UAS. Fuente: <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104>.

2.8.3 Validación

La confiabilidad de los resultados depende directamente de la calidad y exactitud de las mediciones. Antes del despliegue, todos los sensores fueron comparados con patrones de referencia en laboratorio, confirmando que sus errores se mantienen dentro de los límites especificados ($\pm 0,20\text{ °C}$ y $\pm 2,5\%$ HR). Asimismo, se probó la conectividad Bluetooth y la integridad de los datos en intervalos de muestreo de 10 min (ambiente y losa) y 15 min (radiación y ambiente), asegurando un registro continuo sin pérdida de información.

El proceso de selección, descripción y validación de los instrumentos empleados en esta investigación aseguró la confiabilidad de los datos obtenidos. Los criterios técnicos establecidos permitieron garantizar que los equipos cumplieran con los estándares internacionales de precisión y operatividad. Asimismo, la descripción detallada de cada dispositivo evidencia su pertinencia para medir de manera específica las variables de interés en el estudio comparativo entre techo verde y techo convencional. Finalmente, las pruebas y verificación de conectividad confirmaron que los sensores

mantenían un desempeño estable en condiciones reales de uso, asegurando la continuidad del registro sin pérdida de información.

En conjunto, estas acciones fortalecen la validez interna de la investigación, al garantizar que las mediciones recolectadas reflejen de forma fiel el comportamiento térmico de ambos sistemas constructivos, constituyendo una base sólida para el análisis comparativo posterior.

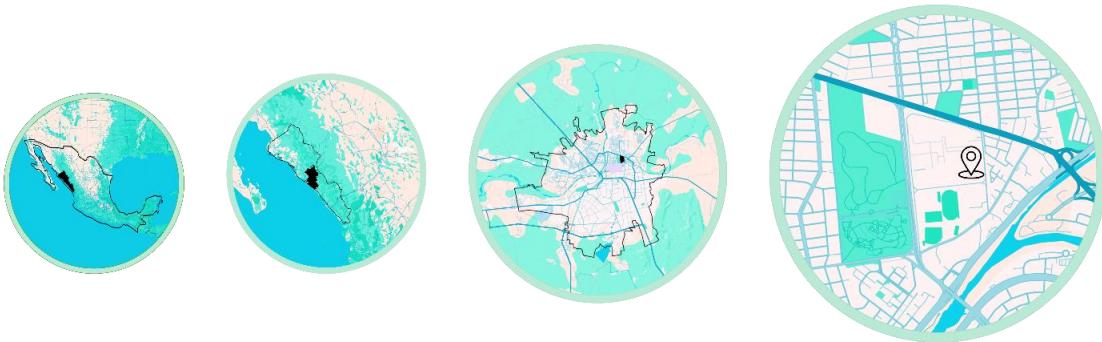
Capítulo III

Aspectos Contextuales

Este capítulo describe el contexto climático, urbano y constructivo de la ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa, donde se ubica la edificación seleccionada para el estudio experimental, véase Figura 21. El objetivo es proporcionar el marco contextual que permita comprender las condiciones en las que se desarrolla la comparación entre una losa con techo verde y otra con techo convencional de concreto armado. Dicho análisis permite dimensionar la relevancia de implementar estrategias pasivas de mitigación térmica en regiones con clima cálido.

Figura 21

Ubicación de caso de estudio en el contexto nacional



Nota. Ubicación de la Facultad de Arquitectura en Ciudad Universitaria (UAS)

3.1 Demografía de Culiacán Rosales

El municipio de Culiacán se localiza en la región centro del estado de Sinaloa, en la planicie costera del Pacífico mexicano. Limita al norte con los municipios de Badiraguato y Mocorito; al sur con Navolato y Elota; al este con Cosalá y Durango, y al oeste con el Golfo de California. Su extensión territorial es de 4,758 km², lo que representa aproximadamente el 8.2 % de la superficie estatal (INEGI, 2020).

La diversidad topográfica del municipio abarca desde áreas costeras y planicies agrícolas hasta zonas serranas de la Sierra Madre Occidental. Esta variedad de entornos físicos explica la coexistencia de distintos tipos de clima, entre ellos cálido seco, cálido subhúmedo y templado semicálido, dependiendo de la altitud y la proximidad al litoral. La capital municipal, Culiacán Rosales, se ubica en el valle central, dentro de la franja de clima cálido semiseco (BSH), caracterizado por altas temperaturas, baja humedad relativa y precipitaciones concentradas en verano.

Culiacán, capital del estado de Sinaloa, es el municipio más poblado de la entidad. Según datos recientes del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024), cuenta con 1,003,530 habitantes y una densidad poblacional de 183.43 hab/km². En total, alberga 281,567 viviendas particulares habitadas, concentradas en su mancha urbana. El municipio se ubica a 64 m s. n. m., en las coordenadas 24°47' latitud norte y 107°23' longitud oeste, dentro del huso horario UTC-6, véase Figura 22.

Figura 22

Delimitación del municipio de Culiacán



Nota. Delimitación del municipio y sus 4 tipos de climas debido a la condición geográfica, manipula,
Fuente: (INEGI 2024)

El crecimiento urbano de la ciudad ha sido acelerado en las últimas décadas: entre 2010 y 2020, la población municipal aumentó en aproximadamente 10 %, consolidándose como una de las ciudades con mayor dinamismo en el noroeste de México (INEGI, 2020). Este proceso ha derivado en la expansión de la mancha urbana y en la reducción de áreas verdes, sustituidas por superficies impermeables como concreto y asfalto. Dicho cambio en el uso del suelo ha favorecido la intensificación del fenómeno ICU, elevando las temperaturas superficiales y afectando las condiciones de confort térmico en las zonas de mayor densidad poblacional (Velasco et al., 2016).

Desde la perspectiva socioeconómica, Culiacán presenta una marcada heterogeneidad: mientras en algunas zonas residenciales predomina la vivienda con sistemas activos de climatización, en amplios sectores de interés social se construyen edificaciones con materiales de baja eficiencia térmica. De acuerdo con el Consejo Nacional de Población (CONAPO, 2020), un porcentaje considerable de la población urbana se encuentra en condiciones de vulnerabilidad por marginación media y baja disponibilidad de infraestructura de confort.

Esta situación se refleja en el elevado consumo eléctrico durante los meses cálidos, cuando el uso intensivo de ventiladores y aires acondicionados incrementa la demanda energética residencial (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2023).

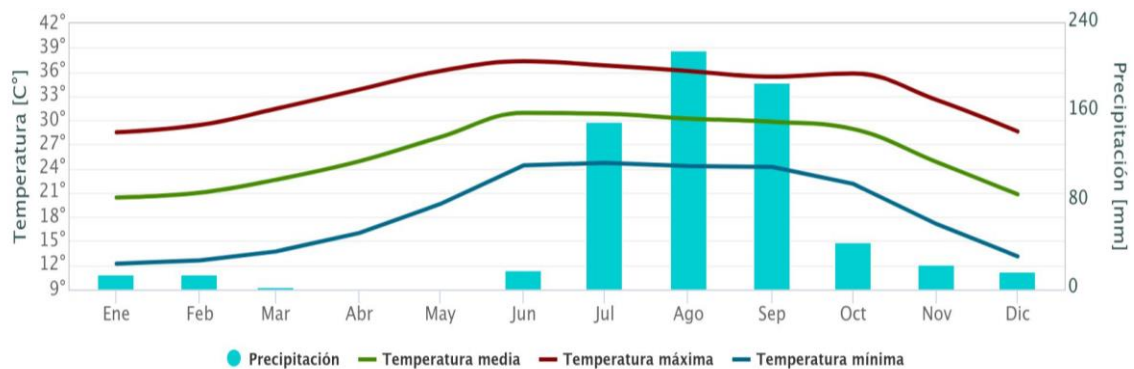
En este contexto demográfico, caracterizado por la concentración poblacional, la urbanización acelerada y la vulnerabilidad socioeconómica, resulta indispensable promover soluciones constructivas sostenibles que contribuyan a mitigar las altas temperaturas interiores.

3.2 El Clima de Culiacán Rosales Sinaloa

Culiacán Rosales, capital del estado de Sinaloa, se ubica en una región con clima cálido semiseco (BSh, según la clasificación de Köppen modificada por García, 2004). De acuerdo con datos del Sistema Meteorológico Nacional (SMN) obtenidos a través de la estación climatológica de Culiacán Rosales, durante el periodo 1991–2020 el mes más cálido es junio, con una temperatura media de 30.9 °C, una máxima promedio de 37.3 °C y una mínima de 24.4 °C, registrando además una precipitación media de 18 mm (SMN, 2020). Esta información se sintetiza en el climograma 1991–2020, véase Figura 23.

Figura 23

Climograma 1991-2020 Culiacán Rosales Sinaloa



Nota. Durante el periodo marcado de 1991-2020, el mes de junio presenta una temperatura promedio más elevada. SMN (<https://acortar.link/DcK252>).

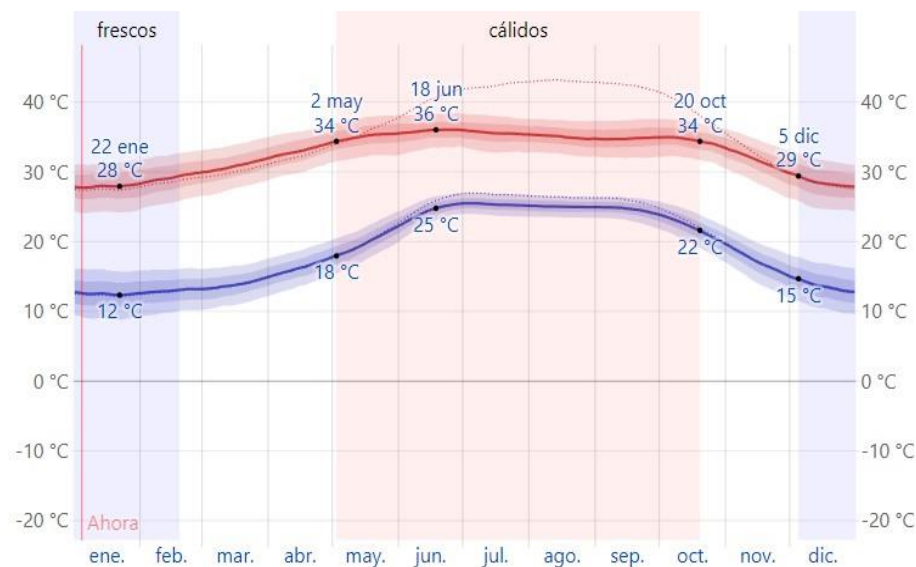
Por otra parte, los registros de la estación climatológica ubicada en la Facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) para el periodo 1995–2020 muestran una temperatura media anual de 26.2 °C y una temperatura máxima promedio anual de 33 °C (Montijo et al., 2021). Las diferencias respecto al climograma del SMN obedecen a la ubicación geográfica de cada estación. En esta misma fuente se documenta que la temperatura máxima registrada fue de 42.5 °C, véase Tabla 14.

Tabla 14*Temperatura máxima promedio por mes en Culiacán*

TEMPERATURA MÁXIMA ABSOLUTA POR MES											
ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
35.0	37.0	37.6	40.0	41.0	41.0	42.0	41.6	42.5	41.5	40.0	34.5

Nota. Datos obtenidos del documento normales climatológicas condicionadas y valores extremos de la Facultad de Biología de la UAS.

De acuerdo con registros complementarios, la temporada cálida en Culiacán tiene una duración aproximada de 5.5 meses, del 2 de mayo al 20 de octubre, con temperaturas máximas promedio diarias superiores a 34 °C. El mes más cálido es julio, con máximas de 36 °C y mínimas de 25 °C. En contraste, la temporada fresca comprende cerca de 2.5 meses, del 5 de diciembre al 19 de febrero, cuando las máximas diarias descienden por debajo de 29 °C; enero es el mes más frío, con mínimas de 12 °C (*Weatherspark, 2024*), véase Figura 24.

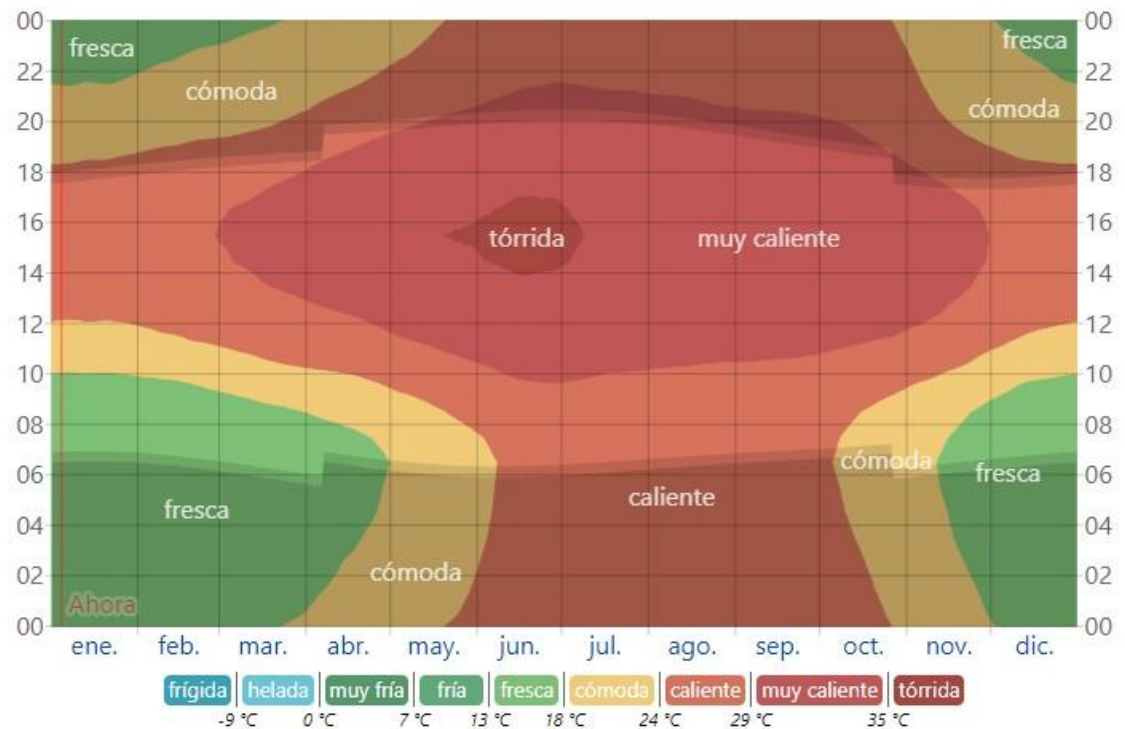
Figura 24*Temperatura máxima y mínima en Culiacán*

Nota. Adaptado de Temperatura máxima y mínima promedio en Culiacán, weatherspark, 2024, (<https://acortar.link/qT4kJ8>)

Asimismo, los registros horarios de temperatura promedio indican que entre las 12:00 y 18:00 h gran parte del año las condiciones térmicas superan los rangos de confort, alcanzando en los meses de verano valores superiores a los 35 °C entre las 14:00 y 17:00 h, véase Figura 25. Estos datos evidencian que, en Culiacán, el rango de confort térmico se ve comprometido durante gran parte del año, lo cual refuerza la necesidad de implementar soluciones arquitectónicas pasivas para mitigar la ganancia térmica en edificaciones. Es de suma importancia conocer la temperatura promedio por hora para determinar en qué momento del día de cada mes las temperaturas están fuera del confort térmico.

Figura 25

Temperatura promedio por hora en Culiacán



Nota. Adaptado de Temperatura promedio por hora en Culiacán, weatherspark, 2024, (<https://acortar.link/N7s4Bn>). CC BY 2. 0.

El municipio de Culiacán presenta una notable diversidad climática derivada de su extensión territorial y su topografía variable, que va desde las planicies costeras hasta las montañas de la Sierra Madre Occidental. Esta condición geográfica propicia la coexistencia de hasta cuatro tipos de clima en su territorio, véase Tabla 15, lo que genera contrastes ambientales significativos entre sus diferentes zonas (INEGI, 2024).

Tabla 15

Diversidad climática del municipio de Culiacán Sinaloa

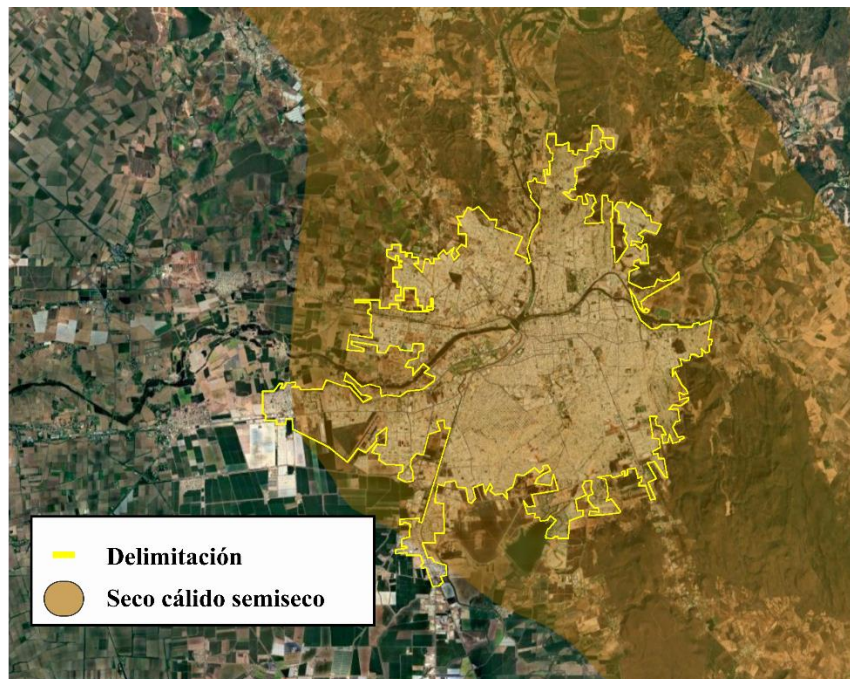
Clima	Características principales
Cálido seco	Altas temperaturas y baja precipitación.
Templado semicálido	Temperaturas moderadas y lluvias estacionales.
Cálido subhúmedo	Mayor humedad relativa y lluvias de verano.
Semiseco cálido (predominante)	Extremos térmicos, baja humedad y fuerte insolación.

Nota. Los cuatro tipos de clima presentes en el municipio de Culiacán se derivan de su condición geográfica (INEGI, 2024).

En el caso de la capital del estado, el municipio Culiacán Rosales, el clima predominante corresponde al cálido semiseco (BSh), de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada para México (INEGI, 2020). A pesar de que el municipio de Culiacán cuenta con cuatro tipos de climas debido a su condición geográfica principalmente La mancha urbana de la ciudad de Culiacán Rosales se ubica dentro de esta franja climática, caracterizada por altas temperaturas durante gran parte del año, baja humedad relativa y radiación solar intensa, véase Figura 26.

Figura 26

La mancha urbana de la ciudad de Culiacán, Rosales Sinaloa



Nota. La zona urbana se localiza dentro de la franja con clima cálido semiseco. Fuente (INEGI, 2020).

3.2.1 Temperaturas Extremas en la Ciudad de Culiacán Rosales

Además de la información generada por organismos oficiales como el INEGI y la Comisión Nacional del Agua, las fuentes periodísticas resultan útiles para documentar episodios climáticos excepcionales ocurridos en la última década. En el caso de Culiacán, diversos medios de comunicación como; Noroeste (2015), el sol de Sinaloa (2021), el Debate (2023) han reportado eventos de calor extremo que superan los promedios históricos, reflejando la creciente vulnerabilidad de la población frente a olas de calor cada vez más intensas y frecuentes.

Estos registros, aunque de carácter periodístico, constituyen un insumo valioso para contextualizar las condiciones de estrés térmico que enfrenta la ciudad y para

reforzar la pertinencia de implementar estrategias constructivas de mitigación, como los techos verdes, en regiones con climas cálidos, véase Tabla 16.

Tabla 16

Eventos de temperaturas extremas en Culiacán Rosales, Sinaloa (2015–2024)

Año	Evento reportado	Fuente periodística
2015	Se alcanzaron 43 °C a la sombra , superando el récord de 1994.	<i>Noroeste</i> (2015)
2017	Registro de 55 °C a la intemperie durante una ola de calor.	<i>Noroeste</i> (2017)
2021	Tres días consecutivos con sensación térmica de 55 °C .	<i>El Sol de Sinaloa</i> (2021)
2023	En mayo, Culiacán fue la ciudad más calurosa del estado, con 43 °C y alta sensación térmica.	<i>El Debate</i> (2023)
2024	Clasificada como la tercera ciudad más calurosa de México .	<i>Reporte 18</i> (2024)

Nota. Elaboración propia con base en reportes periodísticos de la última década.

En síntesis, el clima de Culiacán Rosales se caracteriza por su diversidad, aunque en la capital predomina el cálido semiseco, con temperaturas extremas que alcanzan valores críticos para la salud y el uso de los espacios. Estas condiciones hacen evidente la necesidad de adoptar estrategias arquitectónicas y urbanas que mitiguen los efectos del calor.

Las características constructivas de los techos de edificaciones favorecen la transferencia térmica y la ganancia de calor hacia el interior de los espacios, dado que actúan como envolvente expuesta a radiación, convección y conducción. Estudios de envolventes edificatorias señalan que durante el proceso de transferencia de calor la envolvente del edificio actúa como un filtro interpuesto entre ambos; clima exterior e interior y que la ganancia de calor está determinada por las propiedades térmicas de los materiales, su masa térmica y la exposición a radiación solar. (Hernández-Gómez, 2012, p. 29)

En este sentido, al desarrollar una investigación de tipo cuasiexperimental en un espacio educativo real, se retoman estos puntos de importancia; estructura constructiva de la cubierta, orientación, materialidad y cargas térmicas, para articular el análisis térmico del sistema de techo verde frente a la losa convencional.”

Debido a que el techo verde se para el registro de temperaturas superficiales al interior de las losas de concreto armado y registro de temperatura interior se construyó en una de las aulas de la Facultad de Arquitectura de la UAS las cuales están edificadas con el sistema de marco rígido y losas de concreto armado a continuación se retoma información relevante sobre las características constructivas aplicadas en ellas.

3.3 Características Constructivas de los Espacios Educativos en Sinaloa

Los espacios educativos en Sinaloa presentan características constructivas particulares asociadas a las condiciones climáticas de la región. La mayoría de los planteles escolares fueron edificados bajo programas de construcción estandarizados impulsados por la Secretaría de Educación Pública (SEP) y los gobiernos estatales, especialmente a través del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE), con el fin de garantizar rapidez, economía y durabilidad en la ejecución de las obras (CAPFCE, 1998; INIFED, 2012; SEP, 2019).

En el caso particular de Sinaloa, estos lineamientos nacionales se adaptaron parcialmente a las condiciones locales, priorizando el uso de materiales durables como el concreto armado y los recubrimientos impermeables, pero sin considerar criterios de eficiencia térmica o adecuación bioclimática. La rápida expansión urbana y educativa registrada entre las décadas de 1970 y 1990 favoreció la adopción de modelos constructivos repetitivos, con losas planas y mínima ventilación natural, características que, si bien responden a criterios estructurales y de mantenimiento, resultan ineficientes

frente a las altas temperaturas que caracterizan al clima cálido seco de la región (INEGI, 2020; García, 2004).

Dado que los techos son las superficies con mayor exposición solar y, por tanto, el principal punto de ganancia térmica en los edificios resulta fundamental analizar los sistemas constructivos más utilizados en la región. A continuación, se describe la tipología de techos predominantes en edificaciones educativas de Culiacán Rosales, Sinaloa, enfatizando su comportamiento térmico y su potencial para la incorporación de estrategias pasivas como los techos verdes (Santamouris, 2014; Minke, 2004).

3.3.1 Losas de Concreto Armado

Las losas de concreto armado son una de las soluciones estructurales más comunes en climas cálidos, debido a su solidez, durabilidad y capacidad portante. Están compuestas por concreto reforzado con acero, lo que les otorga gran resistencia a la compresión y a la flexión (González Cuevas, 2016).

Desde la perspectiva térmica, estas losas presentan alta inercia térmica, es decir, acumulan calor durante el día y lo liberan lentamente por la noche. Aunque esta propiedad ayuda a estabilizar la temperatura en ciertos casos, en climas extremadamente cálidos puede ser contraproducente, generando sobrecalentamiento interior (Givoni, 1998; Olgyay, 2015). Para la presente investigación se hizo uso de instalaciones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Sinaloa, donde, las aulas intervenidas cuentan con losas de concreto armado de 12 cm de espesor, impermeabilizadas, pero sin aislamiento térmico adicional, condición representativa de la construcción típica de la ciudad de Culiacán, Rosales Sinaloa.

La ubicación estratégica seleccionada para la construcción del proyecto de investigación en la Facultad de Arquitectura de la UAS dentro del campus universitario CU, el cual se localiza al sector oriente de la ciudad, permite además relacionar el experimento con el contexto urbano inmediato y garantizar la accesibilidad a infraestructura académica para el desarrollo del proyecto. Esta condición convierte al sitio en un laboratorio vivo para la observación y análisis de tecnologías pasivas de adaptación al cambio climático.

El espacio experimental fue implementado en un aula-taller con características constructivas comunes en la ciudad: losa de concreto armado de 12 cm de espesor sin aislamiento adicional, impermeabilización superficial y dimensiones aproximadas de 37 m², el cual se describe en el siguiente capítulo. Sobre una de las secciones se instaló el sistema de techo verde semi-intensivo, mientras que la otra mitad permaneció como losa convencional, sirviendo como control para la comparación.

La localización del experimento dentro de Ciudad Universitaria no solo garantizó condiciones óptimas para el monitoreo térmico, sino que también aportó valor académico y de transferencia de conocimiento, al convertir un espacio educativo en un sitio demostrativo de soluciones basadas en la naturaleza. Esta experiencia, además de generar resultados científicos sobre el desempeño térmico de los techos verdes en clima cálido, establece un precedente para la integración de estrategias pasivas en el diseño y construcción de edificios en la región.

El análisis de los aspectos contextuales permitió comprender el marco en el que se desarrolla la presente investigación. La demografía de Culiacán Rosales evidencia una dinámica urbana acelerada y una alta concentración de población en la mancha urbana,

factores que incrementan la presión sobre los servicios urbanos y la calidad ambiental. A su vez, el clima cálido semiseco característico de la región, con episodios de temperaturas extremas superiores a los promedios históricos, constituye un reto constante para la habitabilidad de las viviendas y edificaciones públicas.

En este escenario, la vivienda local cuenta con la prevalencia de sistemas constructivos convencionales, particularmente losas de concreto armado y losas de vigueta y bovedilla según datos del INEGI 2020, que, si bien garantizan resistencia estructural, presentan limitaciones importantes en términos de confort térmico. Estas condiciones refuerzan la necesidad de explorar soluciones pasivas que mitiguen los efectos del calor en entornos urbanos cálidos.

Finalmente, la localización del experimento en Ciudad Universitaria de la Universidad Autónoma de Sinaloa permitió situar el análisis en un espacio representativo de la tipología constructiva local, con condiciones adecuadas para la medición y comparación del desempeño térmico entre un techo verde y un techo convencional.

Este capítulo establece, por tanto, el contexto demográfico, climático, urbano y constructivo que da sustento a la investigación experimental. A partir de esta base, en el siguiente capítulo se presentan los resultados del monitoreo térmico comparativo, analizando las diferencias observadas en la transferencia de calor, temperatura interior y confort ambiental entre ambos sistemas de cubierta.

Capítulo IV

Análisis Descriptivo e Interpretativo del Techo Verde, la Reducción de Temperatura y Procedimiento e Instrumentación de Registros

El presente capítulo tiene como objetivo presentar el análisis descriptivo e interpretativo de los datos obtenidos a través de la implementación experimental de un sistema de Techo Verde (TV) en una edificación ubicada en la ciudad de Culiacán Rosales, Sinaloa. A partir de la metodología cuasiexperimental aplicada, se exponen las características constructivas del sistema implementado, así como los resultados obtenidos en términos de la reducción de temperatura interior, producto del efecto de mitigación térmica del TV. Este análisis permite evaluar el cumplimiento de la hipótesis planteada, contribuyendo a la generación de conocimiento en el campo de la eficiencia energética y confort térmico en climas cálidos.

El capítulo trata el análisis descriptivo e interpretativo del Techo Verde partiendo de los datos obtenidos de la investigación de campo y documental, basados en una hipótesis planteada, un objetivo general y buscando dar respuesta a la pregunta central, donde fue necesario tomar dos variables: Techo Verde como variable independiente (VI) y Reducción de Temperatura como variable dependiente (VD), cada una cuenta con indicadores específicos definidos en el marco metodológico, partiendo que la metodología se basa en un proyecto cuasi experimental fue necesario la construcción de un Techo Verde escala 1:1. Cabe asentar que la palabra techo verde será retomada continuamente por lo cual se usará la abreviatura (TV).

El proyecto se llevó a cabo sobre la azotea (techo) en uno de los módulos en la facultad de arquitectura de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS), con el propósito

de poder obtener información con equipos registradores de temperatura y humedad para hacer comparativos contra uno convencional, también con la idea de tenerlo como un espacio educativo en temas afines y el desarrollo de otras investigaciones que están relacionadas con los múltiples beneficios que un TV genera al momento de implementarlo.

La UAS cuenta con un campus denominado Ciudad Universitaria (CU) en la ciudad de Culiacán Rosales, donde se centran algunas de las licenciaturas, maestrías y posgrados que lo conforman, la facultad de arquitectura es parte del campus. La facultad se compone actualmente de 5 módulos edificadas; 4 de dos niveles y uno de tres, orientados norte-sur, véase Figura 28.

Figura 28

Ubicación de módulos en la Facultad de Arquitectura Culiacán



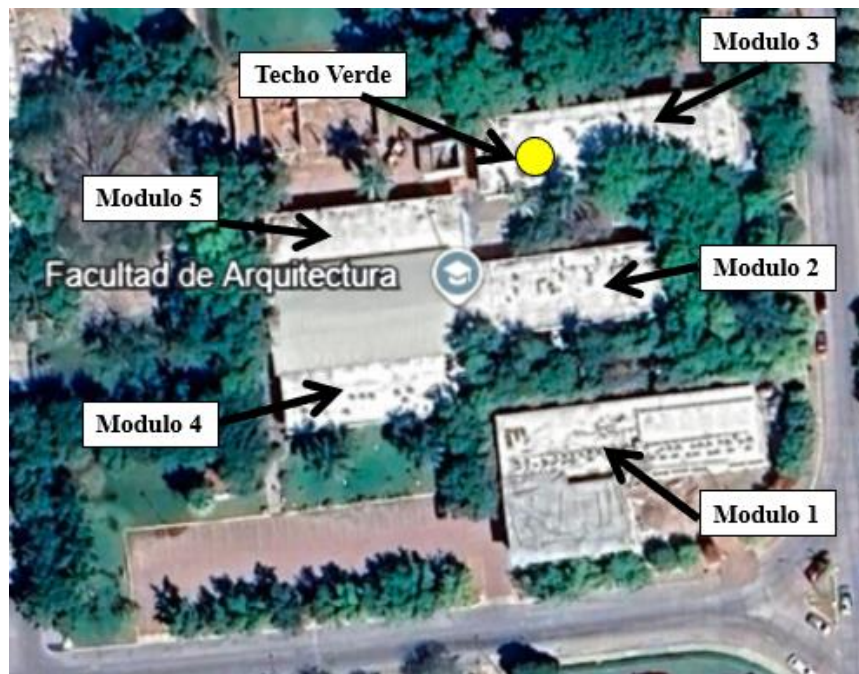
Nota. La facultad es parte del conjunto en CU. Fuente: Google Earth, con intervención personal, captura de la web el 30 de abril 2025.

Debido a la metodología retomada para el desarrollo de los resultados se plantea la construcción de un TV, por lo cual se hizo una revisión de todos los módulos que integran la facultad de arquitectura para seleccionar el área, considerando dos espacios con características similares en cantidad de metros cuadrados interiores y estructura envolvente como: altura, inclinación de las losas (para tomar una hacia el sur por ser la que recibe mayor radiación solar directa), instalaciones ubicadas en las azoteas (techos), vegetación que rodea a cada uno (por la proyección de sombra) y la disponibilidad de agua requerida para el proceso de construcción y mantenimiento.

Partiendo de las necesidades a tomar en cuenta para construir un TV se eligió el módulo 3 debido a que cubre los puntos importantes a tomar en cuenta, la ubicación exacta para el proyecto se indica con el marcador amarillo, véase Figura 28.

Figura 29

Ubicación del techo verde en el módulo 3 en la FAUAS



Nota. Circulo color amarillo ubicación para la construcción del techo verde, Fuente: Google Earth, con intervención, captura de la web el 30 de abril 2025.

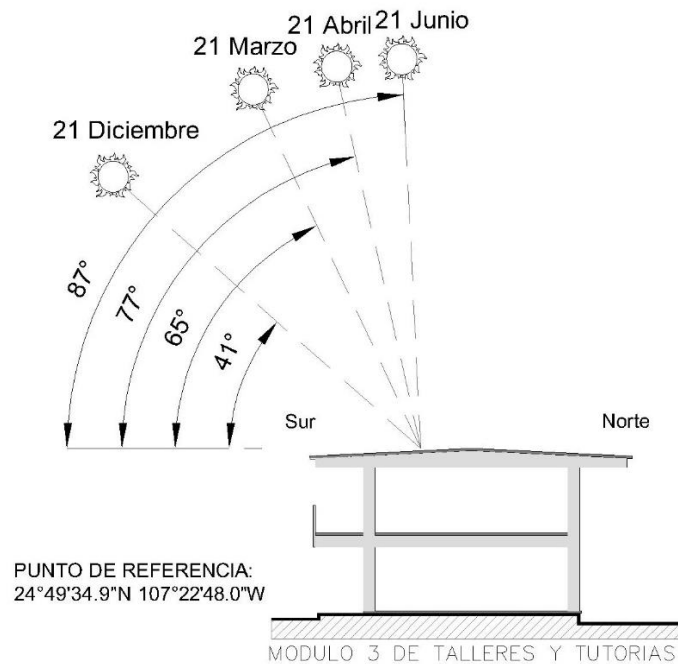
Una vez definido el módulo, se procedió con la selección del área de intervención. Se eligió una losa inclinada con orientación sur, debido a que, en la ciudad de Culiacán Rosales, por su latitud cercana a 25° N, la radiación solar directa presenta mayor incidencia sobre las superficies orientadas hacia el sur durante todo el año.

La altura solar varía de acuerdo con la posición geográfica y el día del año; por ejemplo, durante el solsticio de invierno (21 de diciembre) el ángulo solar al mediodía se aproxima a los 41° , mientras que en el solsticio de verano (21 de junio) alcanza valores cercanos a 87° , cuando el sol se posiciona casi perpendicular a las losas planas o de pendiente mínima. Estos valores se derivan de la geometría solar y se calculan en función de la latitud del sitio (Duffie & Beckman, 2013).

Para análisis del cuasiexperimento se generó registro de temperatura superficial interior de las losas de concreto armado con las sondas y con equipos HOBO se generó el registro de la temperatura y humedad relativa del interior en cada uno de los espacios; el taller siete usado como testigo y el taller ocho donde se colocó el techo verde, iniciando con el registro el 21 de marzo cuando el sol tiene una inclinación de 65° (equinoccio de primavera) y terminó el 21 de abril cuando se llega a los 77° , como se muestra, véase Figura 30.

Figura 30

Inclinación del sol para el punto de referencia del área de análisis



Nota. Esquema para representar la inclinación del sol con referencia a la losa del techo verde, punto de referencia de Google maps.

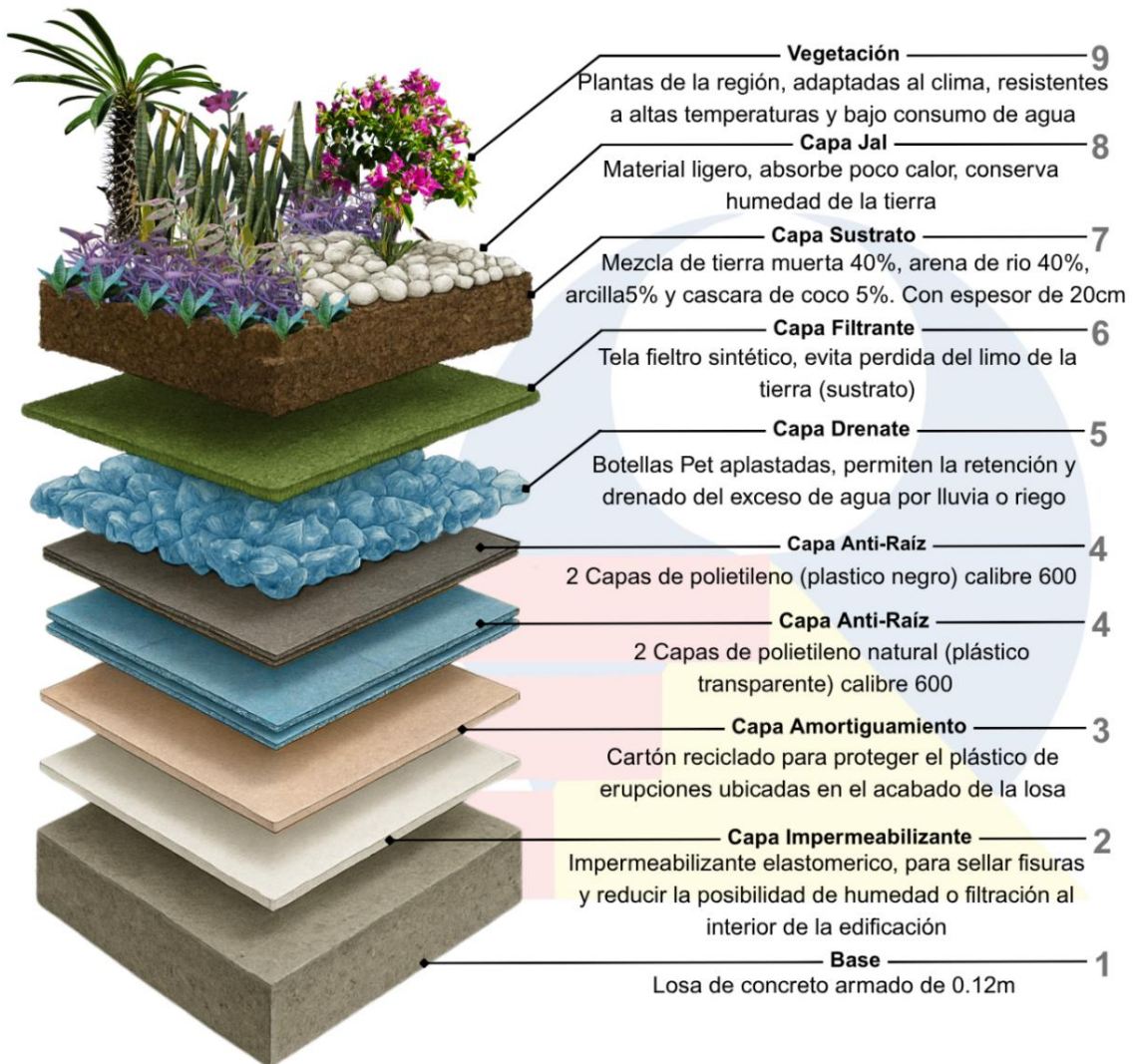
Una vez seleccionado el espacio para la construcción del TV con base en puntos clave, se procede con la interpretación de las variables tomadas en cuenta para el desarrollo de la investigación, como se mencionó anteriormente estas variables son; Techo Verde (VI) y Reducción de Temperatura (VD), cada una con diferentes conceptos, categorías e indicadores necesarios para llegar a un resultado específico.

4.1 Techo Verde

El TV es el componente principal en esta investigación, el cual tiene décadas usándose con diferentes fines como se ha mencionado anteriormente, aquí se implementa para hacer mediciones de transferencia de calor a través del elemento con mayor exposición directa a la radiación solar. Se diseñó una estructura para la construcción del techo verde experimental de la presente investigación, véase Figura 31.

Figura 31

Diagrama de la estructura del TV diseñado para la investigación



Nota. Se tomó en cuenta información de anteriores investigaciones para generar la estructura, se aporta con la capa de amortiguamiento y la capa de jal, las cuales generan beneficios adicionales.

Para el análisis descriptivo e interpretativo de la variable independiente: Techo Verde, se abordan dos conceptos: componentes y clasificación; los conceptos se catalogan en: soporte base y las capas que conforman el TV, tomando en cuenta los siguientes indicadores: análisis estructural, losa de concreto, y las capas que se conforman de:

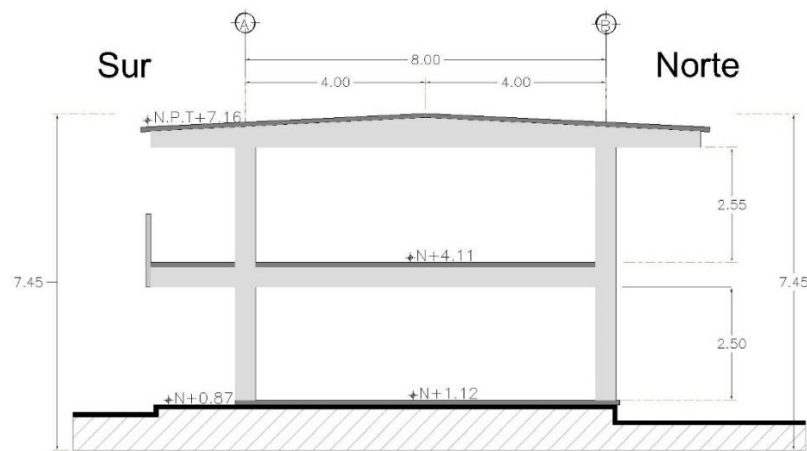
impermeabilizante, cartón reciclado, plástico polietileno, drenante, filtrante, sustrato y vegetación. Ahora se hace una descripción de los elementos requeridos para el TV.

4.1.1 Soporte Base para el Techo Verde

El soporte base, primer aspecto a tomar en cuenta para la colocación de un techo verde, debido a que se le va a generar una carga derivada de los materiales requeridos para conformarlo, el soporte puede ser de: madera, concreto, acero y/o combinación de materiales, por lo cual es necesario determinar la cantidad de peso adicional que puede soportar. Las aulas de la FAUAS fueron construidas con marco rígido, lo que permite generar un peso adicional para un techo verde semi-intensivo, véase Figura 32.

Figura 32

Corte estructural, módulos de la FAUAS



Nota. Esquema gráfico estructural del módulo, sistema constructivo de marco rígido. Los módulos están conformados con una distancia entre las columnas es de 8.0m a eje, la altura de entre pisos es de 3.0m, las vigas tienen un peralte de 0.60m incluyendo la losa la cual es de 0.15m.

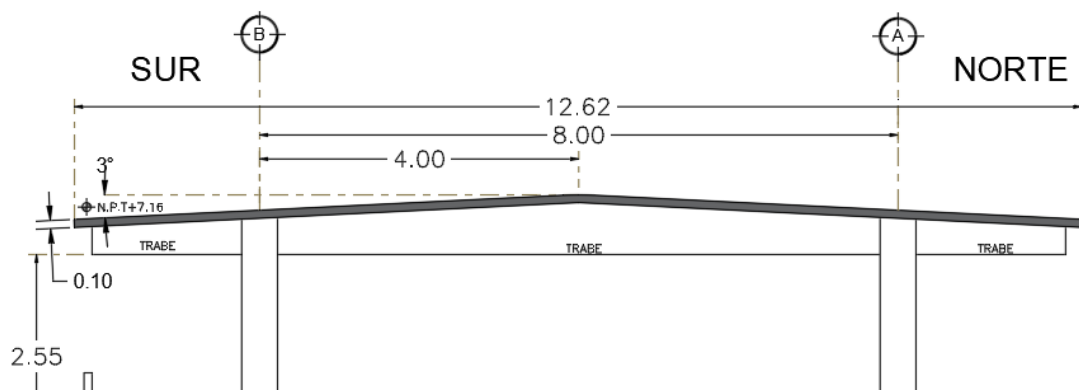
Teniendo clara la estructura del TV aplicada para la investigación, se hará una descripción de cada una de las partes dejando claro que puede tener cambios ajustados a las necesidades del lugar donde se va a colocar siempre que se cumplan los requerimientos mínimos, para no afectar la estructura de la edificación ya que se buscan

beneficios sin generar problemas. En primer lugar, tenemos la base, la cual recibe las capas que conforman el TV, como se describe en la infografía, véase Figura 32. Es una losa de concreto armado, la cual se conforma como se explica a continuación.

Losa de concreto armado. con un espesor de 0.10m aproximadamente, ubicada a 7.16m del nivel piso terminado, azotea de un módulo de dos niveles, con estructura de marco rígido de columnas con una separación de 8.00m a eje, un ancho total de 12.62m, a dos aguas norte-sur con una pendiente del 3%, véase Figura 33.

Figura 33

Corte de representativo de la losa (techo)

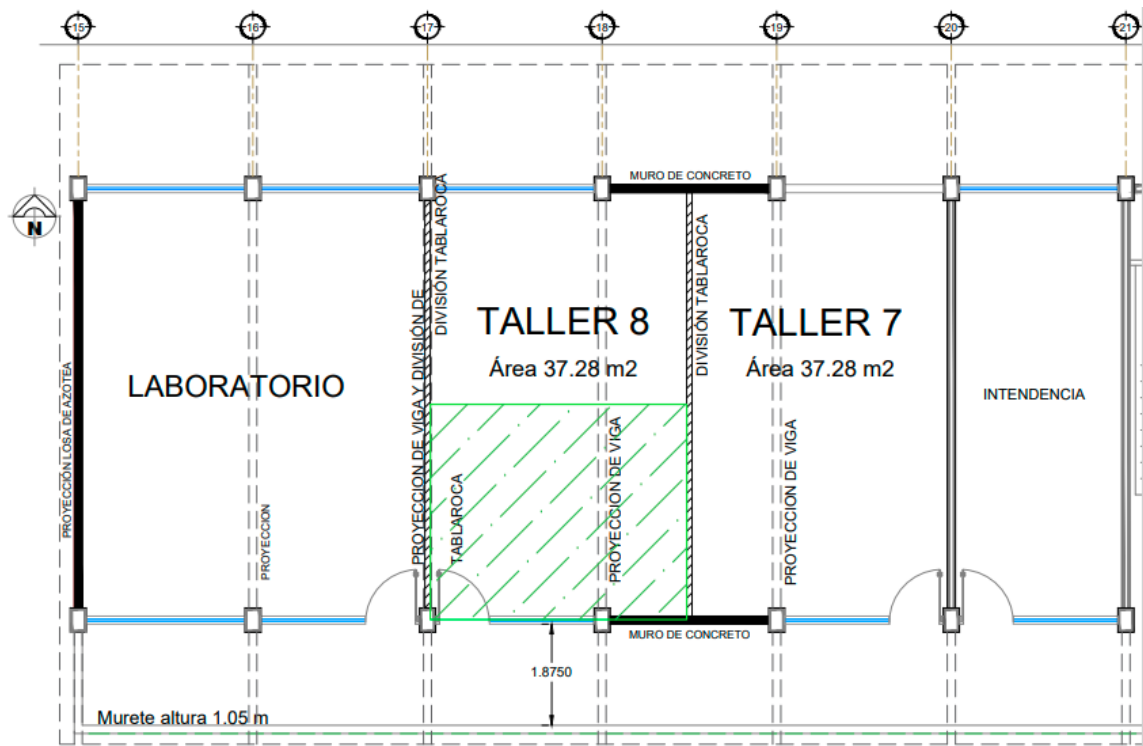


Nota. La losa de concreto armado, colada monolíticamente con las trabes (vigas).

La vista en planta nos permite ubicar los apoyos estructurales vigas y columnas donde descansa el techo verde, el cual tiene una distancia de 8.0m en sentido transversal (ancho) y 3.24m en sentido longitudinal del módulo, ambas medidas son a eje, cuenta con techo volado al norte y sur de 2.30m, el espacio para el TV corresponde al taller ocho del cual se tomó la mitad la cual tiene la pendiente al sur, tiene división de tablaroca para dividir con el laboratorio, el acceso de los espacios se ubica al sur, ambos talleres con ventana al sur, solo el taller ocho tiene ventana al norte, ambos talleres comparten muro cortante de concreto, véase Figura 34.

Figura 34

Vista en planta del espacio seleccionado para el techo verde



Nota. Se toma el taller 8 para poner techo verde representado con recuadro color verde y el 7 para usar de testigo en la comparación de temperatura superficial interior de las losas de concreto armado, al igual que la temperatura y humedad del espacio interior.

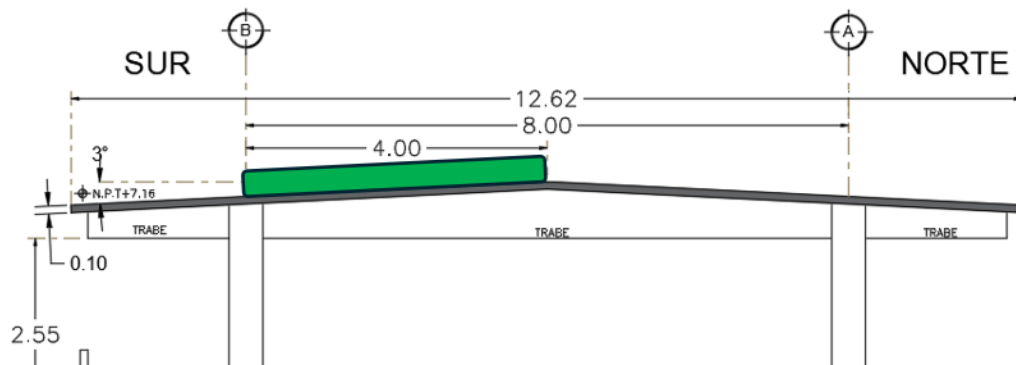
Los techos verdes se pueden colocar en losas inclinadas: donde es necesario tomar en cuenta los grados de inclinación para determinar el tipo de sustrato a colocar, así como la colocación de elementos para retenerlo y tipo de vegetación (con raíz) que genere la retención del sustrato; y en losas planas con pendiente mínima, en este caso el techo tiene una pendiente del 3% aproximadamente y esto es un beneficio para el proyecto debido a que se drena por gravedad en algún momento que se tenga una saturación de agua principalmente por lluvia.

Losa plana con pendiente del 3%: una condición que facilita el escurrimiento del exceso de agua que se pudiera generar en el *Techo Verde* por riego o lluvia. Es importante

indicar que se delimito solo la mitad de la losa correspondiente al interior del taller (aula) para construir el TV, véase Figura 35.

Figura 35

Representación gráfica corte sección de losa (techo) para el TV.



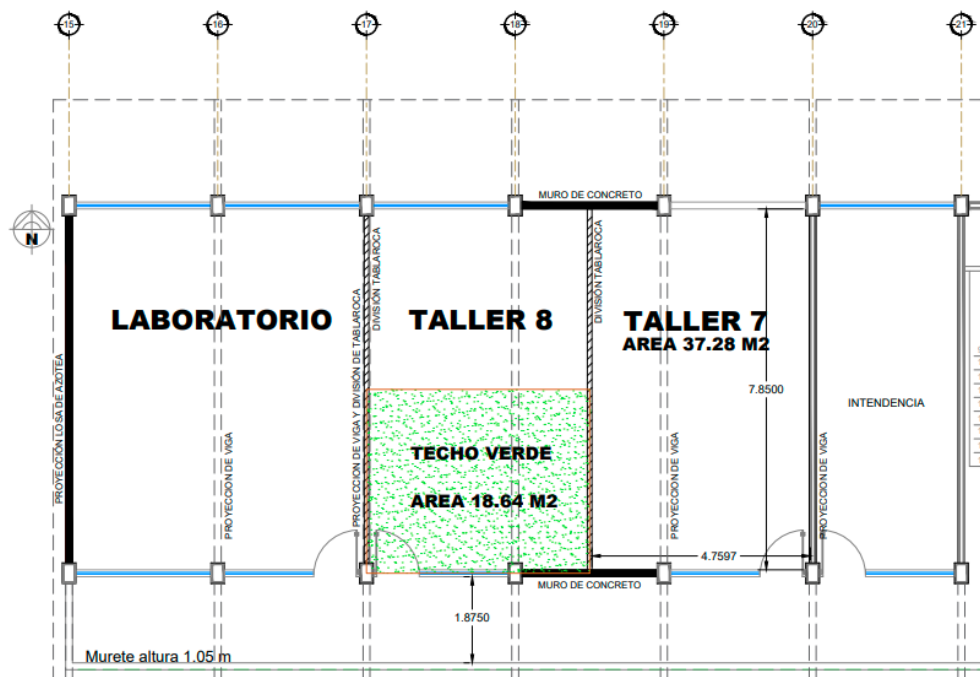
Nota. Rectángulo color verde representa la sección donde se colocó el TV.

Debido a que la azotea no cuenta con una barrera perimetral se consideró dejar libre el espacio del volado sur (que proporciona sombra al corredor de acceso a las aulas) para reducir riesgos al momento de trabajar con la construcción del TV, durante el mantenimiento y las posibles visitas que se puedan tener para contemplar o hacer otro tipo de análisis, ya que se encuentra a 7.16m de altura del nivel de banqueta, esta parte es de 2.30m del eje de la viga y columna al límite de la losa.

Después de conocer los aspectos estructurales y características de la losa (techo) se valora la cantidad de metros cuadrados para crear el TV, siendo un proyecto cubierto con recursos propios, tomando en cuenta la inversión requerida y la cantidad de trabajo necesario para realizarlo se optó por hacerlo solo en la mitad del espacio correspondiente al aula taller ocho, lo cual se indica a continuación, véase Figura 36.

Figura 36

Espacio seleccionado para la construcción del proyecto



Nota. Representación espacio destinado para el TV en color verde. La opción de hacerlo solo en la mitad del espacio correspondiente al interior del aula (taller) no representa inconveniente ya que se usaría una sonda (equipo especial registrador de temperatura) para medir la temperatura por contacto al interior de la losa. Son 18.64 metros cuadrados aproximadamente en total los usados para TV.

Se genero una serie de trabajos previos a la instalación del techo verde, iniciando con limpieza del área, véase Figura 37. Para hacer trazo el cual fue necesario para delimitar el espacio perimetral, tomando en cuenta el interior del aula taller ocho.

Figura 37

Limpieza y trazo en el techo, aula taller ocho

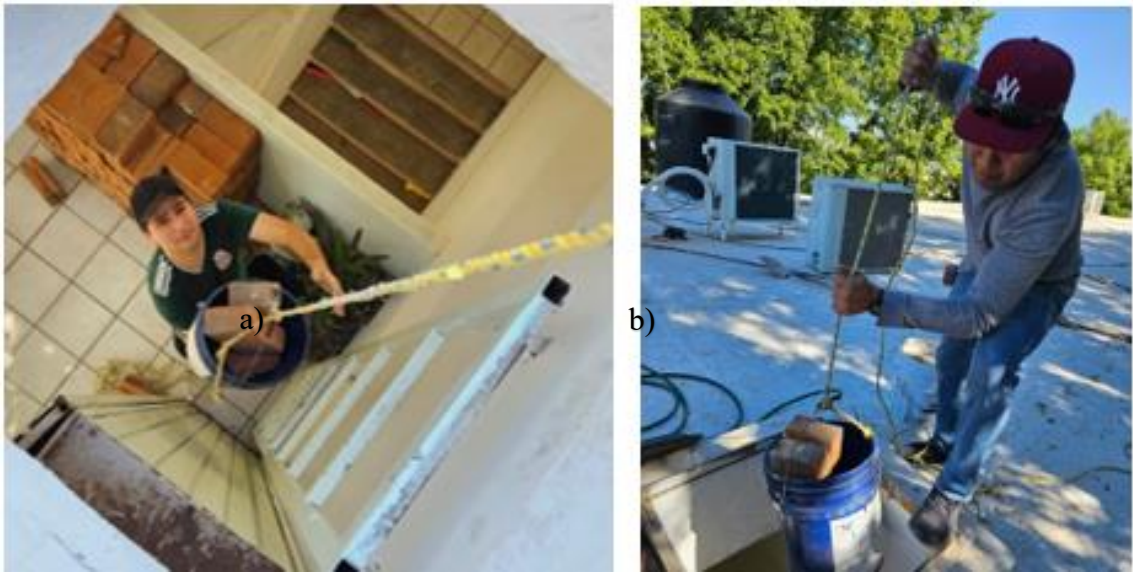


Nota. Limpieza y trazo, para delimitar el espacio del proyecto. Se conto con el apoyo de alumnos de la Facultad para llevar a cabo los trabajos.

Se tuvo que subir ladrillo de barro recocido para hacer la delimitación del espacio destinado para colocar el techo verde sobre la losa del taller ocho, véase Figura 38.

Figura 38

Se subió ladrillo de barro recocido

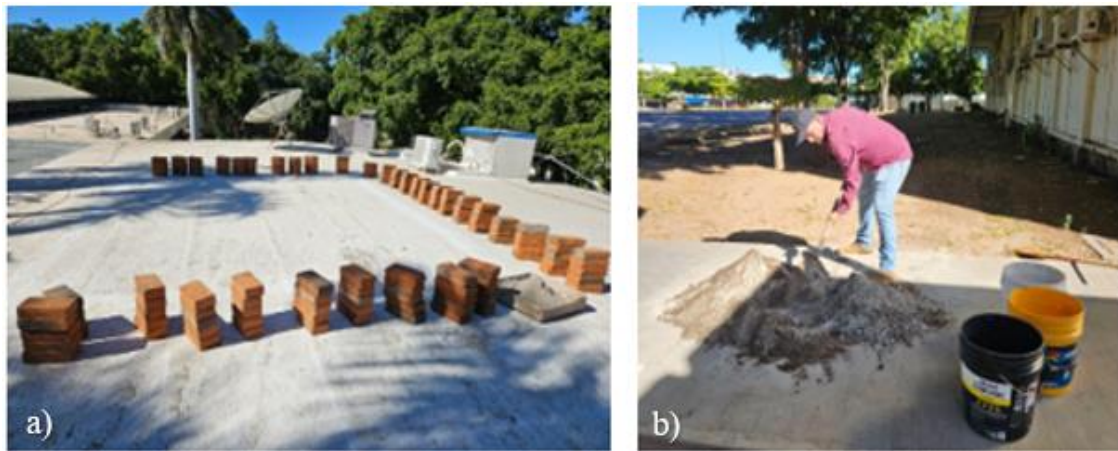


Nota. a) y b) Se facilitó la escotilla del módulo para subir parte del material a la azotea.

Para la delimitación del espacio se optó por el ladrillo rojo (barro recocido) tomando en cuenta el material para su fabricación, que se produce en una zona cercana, apoyo a la economía local y la facilidad para subir al techo ubicado en un segundo nivel, se usó mortero mezclado con arena de río y agua para pegarlos, véase Figura 39.

Figura 39

Proceso delimitación del espacio para el TV



Nota. a) Ladrillo en perímetro del área para el TV, b) Mezcla arena de río y mortero para pegar el ladrillo.

El desempeño térmico, estructural y funcional de un techo verde depende en gran medida de la adecuada selección, disposición y calidad de sus capas constitutivas. Cada estrato cumple funciones específicas que, en conjunto, permiten maximizar los beneficios ambientales y constructivos del sistema, tales como el control de la temperatura, la gestión pluvial, la protección estructural y la viabilidad del crecimiento vegetal (Oberndorfer et al., 2007; Berardi, 2015).

En este apartado se detallan las capas que conforman el techo verde desarrollado para el presente estudio experimental, considerando tanto los lineamientos técnicos como las adaptaciones prácticas derivadas del contexto local.

4.1.2 Capas del Techo Verde

Un techo verde se compone de diferentes capas las cuales son esenciales para proteger la estructura de la edificación donde se aplica, aquí se describe cada una.

Impermeabilizante. El techo del módulo seleccionado cuenta con capa de impermeabilizante, pero debido a que se colocó hace varios años fue necesario aplicar

dos capas de impermeabilizante elastómero en el área para del techo verde y poder sellar fisuras y disminuir la posibilidad de filtración de agua, véase Figura 40.

Figura 40

Proceso de impermeabilización del espacio



Nota. a) y b) Fisuras en impermeabilizante existente, c), d) Aplicación de impermeabilizante en losa y e) Aplicación de impermeabilizante en murete construido.

La segunda capa es aportación personal, esta consiste en la colocación de cartón reciclado debido a que la losa (techo) presentaba algunas erupciones, véase Figura 41.

Figura 41

Erupciones sobre el techo



Nota. Las erupciones podrían dañar la capa de plástico, estas imperfecciones son resultado de trabajos aplicados con antelación sobre la losa.

Cartón reciclado. Se integró esta aportación debido a que la losa presentaba pequeñas irregularidades que podrían dañar la capa de plástico; por ello, se decidió colocar una capa de cartón reciclado para amortiguar, véase Figura 42. Con esta medida se reduce la posibilidad de que el plástico sufra daños y, además, el cartón actúa como aislante térmico gracias a sus propiedades, ya que presenta conductividades térmicas comparables a las de aislantes contemporáneos (Čekon, Struhala y Slávik, 2017), contribuyendo así a mejorar el resultado esperado.

Figura 42

Capa de cartón reciclado



Nota. La capa de cartón tiene la función de amortiguar entre la losa que presentaba erupciones y la capa anti-raíz: plástico negro (polietileno).

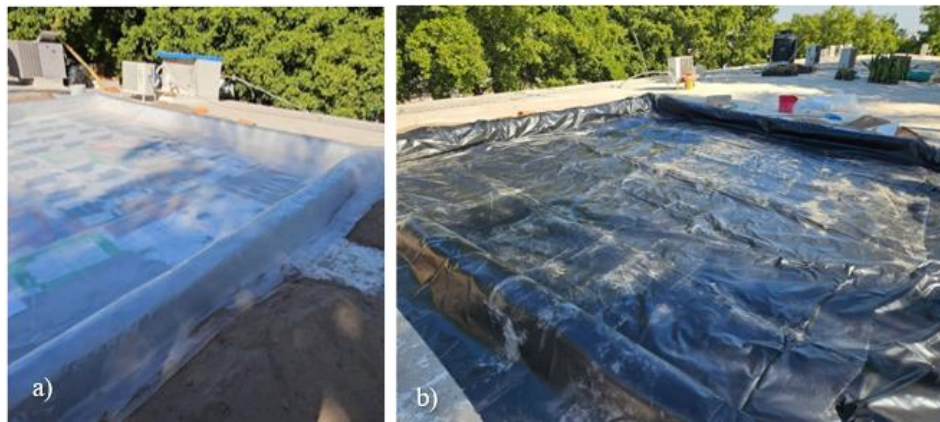
La siguiente capa es la encargada de evitar la filtración de agua y humedad al interior por medio del techo, esta capa se coloca sobre el cartón reciclado, existen diferentes materiales que se podrían tomar en cuenta para colocar, pero un factor importante es el costo, en este caso el plástico de polietileno es accesible y cumple la función.

Anti-raíz. está hecha de con capas de polietileno (plástico negro y natural) tiene la función de impedir que las raíces de las plantas lleguen a la losa (techo) y generen

algún tipo de daño. En total se colocaron 3 capas de plástico polietileno natural y 3 negro calibre 600, véase Figura 43.

Figura 43

Capas de plástico; polietileno natural (transparente) y negro



Nota. a) 3 capas polietileno natural, b) 3 capas polietileno negro), ambos de una sola pieza cada una, cubriendo hasta el borde perimetral.

Hasta este punto se tienen las capas que se encargan de evitar la filtración y humedad en la lasa de concreto, se continua con el resto de las capas; drenante, filtrante, sustrato y vegetación, concluyendo con una capa de jal entre las plantas colocadas.

La capa drenante cumple una función esencial en el sistema de techo verde, permitiendo evacuar el exceso de agua producto de lluvias o riego, evitando encharcamientos que puedan afectar o comprometer la estabilidad del sustrato (Berardi, 2015). Su correcta selección asegura un adecuado balance hídrico, promoviendo la oxigenación de las raíces y prolongando la vida útil del sistema.

Drenante. Capa aplicada para drenar el exceso de agua por riego o por lluvia y reducir la posibilidad de putrefacción de la tierra; en esta capa se colocaron botellas Pet aplastadas de diferentes tamaños con la apertura (boca) hacia la parte de arriba lo que permite el ingreso de agua para retener una parte y propiciar que las raíces de las plantas

puedan ingresar cuando se extienden en la búsqueda de humedad, véase Figura 44. Se muestra la capa de botellas PET colocadas sobre el polietileno, teniendo cuidado que cubran el total del área destinada para el techo verde, la separación de las botellas permite el escurrimiento de agua ya que evita que las capas siguientes quedan aplanadas a la losa.

Figura 44

Colocación de botellas PET (Aplastadas)



Nota. La parte de abajo queda libre para permitir el escurrimiento natural del exceso de agua por gravedad, sea por lluvia principalmente o por riego.

Una vez colocadas las botellas PET se coloca la capa filtrante, la cual actúa como barrera física que impide el arrastre de partículas finas del sustrato hacia las capas inferiores, protegiendo tanto la capa drenante como la impermeabilización subyacente (Oberndorfer et al., 2007). Su incorporación resulta indispensable para mantener la integridad del sistema a largo plazo, facilita el drenaje eficiente.

Filtrante. Capa colocada para filtrar el exceso de agua y reducir la pérdida de limo, se usó fieltro comercial, se colocaron dos capas las cuales cubren la totalidad del espacio para el techo verde, así como la barrera de ladrillo para delimitar el espacio y con

ello proteger las capas de plásticos de los rayos solares para alargar la vida útil, véase Figura 45.

Figura 45

Colocación de fieltro



Nota. El rollo de fieltro tenía aproximadamente 0.90 metros de ancho, por lo cual se optó por unir tiras aplicando costura en máquina de coser, con el fin de cubrir la totalidad del área y garantizar que la capa permaneciera en el lugar necesario

El sustrato constituye el medio de soporte físico, químico y biológico para el desarrollo de la vegetación. Sus propiedades de retención de agua, porosidad, estabilidad estructural y contenido orgánico son factores determinantes para el éxito funcional del techo verde (Getter & Rowe, 2006). La selección adecuada del sustrato debe considerar tanto las especies vegetales seleccionadas como las condiciones climáticas locales.

Sustrato. Para el experimento se mezcló y subió a la azotea arena de río 40% la cual permite que el sustrato no se compacte, tierra muerta 40% usada comúnmente para la colocación de vegetación, arcilla 15% tomada del sitio, cascara de coco 5% funciona como nutriente. Para facilitar subir el material se instaló una rondana, véase Figura 46.

Figura 46

Proceso para preparar el sustrato



Nota. a) Tierra muerta, b) Arena de río, c) mezcla de tierra y arena, d) forma en la que llegó el material a la azotea. Fue vital el apoyo de alumnos de la Facultad. Para el proceso se mezcló la arena de río, la tierra muerta y la arcilla sobre una banqueta para lograr una homogeneidad, una vez teniendo completado el proceso se subió a la azotea del edificio con el uso de botes y una rondana para facilitar el trabajo.

Para la capa de sustrato se utilizó cáscara de coco, la cual forma parte de los desechos de un establecimiento donde se comercializa este producto, pero resulta ideal para integrarse al proyecto. Debido a que la cáscara contiene agua en su corteza, se expuso al sol durante ocho días para que perdiera humedad, se secase y quedara lista para mezclarse con el resto del sustrato, véase Figura 47.

Figura 47

Proceso de secado cascara de coco



Nota. La cascara de coco se consiguió en un puesto donde venden el producto preparado.

Una vez colocada una capa de tierra muerta mezclada con arena, se esparció la cáscara de coco, véase Figura 48. Posteriormente, se continuó con la colocación de la capa de sustrato, consistente en tierra muerta mezclada con arena de río con la cual se generó una capa de 15 cm aproximadamente. En esta mezcla, la cáscara funciona como abono para las plantas y contribuye a disminuir el peso de la capa al ocupar espacio por sus propias características esponjosa

Figura 48

Capa de cascara de coco



Nota. La cascara de coco se colocó por todo el espacio para generar una capa.

La vegetación. es el componente visible y activo del sistema de techo verde, responsable de generar múltiples beneficios ambientales como el sombreado, la evapotranspiración y la mejora estética del entorno construido (Santamouris, 2014). La elección de especies considera aspectos como: tolerancia a sequía, adaptación a clima cálido, bajo mantenimiento y compatibilidad con la profundidad del sustrato disponible.

En este punto fue esencial visitar el Jardín Botánico de Culiacán, donde se recibió asesoría sobre las plantas adecuadas para el tipo de proyecto trabajado. Para conocer el costo de las plantas, se acudió a diferentes viveros de la ciudad de Culiacán Rosales, entre ellos uno municipal ubicado en el Parque Culiacán 87. Allí pudo realizar un recorrido y verificar la existencia disponible, véase Figura 49. En anexo 2 está la paleta vegetal usada en el techo verde.

Figura 49

Diversidad de especies aptas para el TV experimental



Nota. Algunas de las especies ideales para el proyecto, a) Vivero municipal b) Niña en barco verde, c) Niña en barco morada, d) Oreja de burro enana, e) Corona de cristo mini, f) Flor del desierto, g) Palma de madagascar, h) Buganvilia enana y i) Candelilla.

El vivero municipal del parque Culiacán 87, es parte de la dirección de parques y jardines del municipio de Culiacán donde se me informo que podría ingresar un oficio explicado la intensión del proyecto de investigación y existía la posibilidad de tener un donativo de plantas dependiendo de su inventario. Se ingresó oficio ante la dependencia encargada con la información del proyecto y recalcando que era financiado con recursos propios (beca CONAHCYT/SECIHTI) por lo cual se buscaba el apoyo.

Se conto con una respuesta positiva ante la petición en total fueron dos memorándums los que me entregaron, el primero con la especificación de especie y cantidad de plantas, en el segundo solo se colocó la cantidad para que las plantas se seleccionaran dependiendo la existencia en el vivero, véase (Anexo 1).

Con esto queda concluido lo relacionado con la primera variable retoma *Techo Verde*, a continuación, se describe información relevante relacionada con la segunda variable *Reducción de Temperatura* y algunos términos como: la conductividad térmica en losas de concreto armado, estrategias para la reducción de temperatura en losas de concreto, transferencia por radiación.

4.2 Reducción de Temperatura

Para el análisis descriptivo e interpretativo de la Reducción de Temperatura, se considera como base conceptual la transferencia de calor en dos categorías fundamentales: conducción y radiación. Los indicadores de análisis fueron la temperatura superficial de la losa y las condiciones de temperatura y humedad relativa en el entorno inmediato e interior de los espacios experimentales. Existen diferentes estrategias con las cuales se busca la reducción de la temperatura en las losas de concreto lo cual es

importante ya que pueden ser aplicadas en las edificaciones y con ello contribuir a mejorar las condiciones de confort interior.

4.2.1 Conductividad Térmica en Losas de Concreto Armado

La conductividad térmica es una propiedad física que indica la capacidad de un material para permitir el paso del calor a través de su masa. Se expresa comúnmente en vatios por metro por grado Kelvin ($W/m \cdot K$) y representa uno de los factores fundamentales para determinar el comportamiento térmico de los elementos constructivos (ASHRAE, 2017).

Un estudio titulado Propiedades Térmicas de Materiales Convencionales y No Convencionales en la Construcción de una Vivienda Rural, generado por la Facultad de Arquitectura desarrollado en el marco del Laboratorio Nacional de Vivienda y Comunidades Sustentables de la UNACH, en lo referente a la Losa de concreto armado obtuvo describe: La muestra de losa de concreto armado evaluado tiene un espesor promedio de 0.1018 m. La muestra cumple con el área mínima para el ensayo, midiendo la muestra 0.30m x 0.30 m. El período de medición fue el 6 de octubre de 2022, de 9:00 a 19:00 horas (Torres et al., 2024). Resumen de resultados, véase Figura 50.

Figura 50

Resultados de ensayo de la losa de concreto armado

Variable	Valor promedio
Conductividad térmica aparente ($W/m K$)	2.036
Resistencia térmica (m^2K/W)	0.05
Espesor (m)	0.1018
Temperatura media de trabajo del EPCG ($^{\circ}C$)	31.05
Temperatura en la placa caliente ($^{\circ}C$)	40.35
Temperatura en la placa fría ($^{\circ}C$)	21.54
Diferencia de temperatura de las placas ($^{\circ}C$)	18.81
Área de medición efectiva (m^2)	0.128
Potencia suministrada (W/ m^2)	381.83
Inicio de ensayo (hr:mm) – término del ensayo (hr:mm)	9:00 h a 19:00 h 10 horas de medición apróx.

Nota. Retomado del documento (Torres et al., 2024)

En contraste, materiales como el poliestireno expandido (EPS), utilizado en las bovedillas del sistema vigueta y bovedilla, presentan una conductividad térmica muy baja, alrededor de 0.03 a 0.04 W/m·K, lo que los convierte en excelentes aislantes térmicos (Álvarez, 2017). Esta baja conductividad limita la transferencia de calor hacia el interior del edificio, reduciendo la ganancia térmica y, por ende, la demanda de energía para enfriamiento. Se genera un resumen comparativo sobre la conductividad térmica de materiales usados comúnmente en edificaciones, véase Tabla 17.

Tabla 17

Conductividad térmica de materiales usados en losas

Material	Conductividad térmica (W/m·K)	Observaciones térmicas
Concreto armado	1.4 – 1.8	Alta conductividad, favorece la acumulación de calor
Acero de refuerzo	~50.0	Muy alta, aunque su volumen en la losa es limitado
Poliestireno expandido (EPS)	0.03 – 0.04	Baja conductividad, excelente aislante térmico
Ladrillo cerámico	0.5 – 0.7	Conductividad moderada, mejor que el concreto pero menor que el EPS
Madera (seca)	0.12 – 0.15	Baja conductividad, poco frecuente en losas, pero útil como acabado

Nota. Generada con información (Álvarez, 2017).

En función de estas características, la incorporación de materiales con baja conductividad térmica como el EPS o soluciones vegetales como el techo verde permite mejorar el comportamiento térmico de las losas, lo cual es especialmente valioso en regiones como Culiacán, donde las temperaturas diarias superan con frecuencia los 35 °C. Esta estrategia reduce la transferencia de calor por conducción hacia el interior de los espacios, favoreciendo una temperatura interior más estable y confortable.

4.2.2 Estrategias Pasivas para la Reducción de Temperatura en Losas de Concreto

Como se mencionó en el apartado teórico existen estrategias pasivas para reducir la temperatura en losas de concreto armado, se pueden implementar diversas estrategias como el uso de materiales reflectantes, aislamiento térmico, *vegetación en techos* y la aplicación de impermeabilizantes blancos. Estas medidas ayudan a disminuir la transferencia de calor.

Materiales Reflectantes. Una de las estrategias pasivas más efectivas para reducir la temperatura en las losas de concreto expuestas a radiación solar es el uso de materiales reflectantes. Estos materiales tienen la capacidad de reflejar una mayor proporción de la radiación solar incidente, reduciendo así la ganancia térmica del elemento constructivo. El albedo de la superficie, es decir, su capacidad de reflejar la radiación solar es un factor determinante en el comportamiento térmico del techo.

Estudios han demostrado que incrementar el albedo de una cubierta puede reducir significativamente su temperatura superficial. Levinson et al. (2010) encontraron que el uso de recubrimientos reflectantes en techos puede disminuir su temperatura hasta en 30 °C en comparación con materiales convencionales. Esta reducción no solo disminuye la temperatura del espacio interior, sino que también contribuye a mitigar el fenómeno de isla de calor urbana.

Los materiales reflectantes más comunes incluyen pinturas especiales de alto albedo, membranas de PVC reflectante y recubrimientos cerámicos. Estos pueden aplicarse directamente sobre la superficie de la losa o integrarse como parte de un sistema de impermeabilización reflectante.

Aislamiento Térmico. El aislamiento térmico en techos de concreto es una estrategia fundamental para limitar el flujo de calor hacia el interior de una edificación. Este método no actúa reduciendo la temperatura superficial del techo, sino minimizando la transferencia de calor mediante la reducción de la conductividad térmica del sistema de cubierta.

Entre los materiales comúnmente empleados como aislantes se encuentran el poliestireno expandido (EPS), poliuretano, lana mineral y paneles de fibra de vidrio. Su efectividad depende de factores como el espesor del material, la continuidad del aislamiento y su resistencia térmica (valor R). Según Oteiza San José (2005), un adecuado diseño de aislamiento térmico en techos de concreto armado puede reducir hasta en un 40 % la carga térmica interna en climas cálidos.

La elección del material aislante debe considerar no solo su desempeño térmico, sino también su resistencia mecánica, compatibilidad con el sistema constructivo y durabilidad frente a condiciones climáticas adversas.

Impermeabilizantes Blancos. Los impermeabilizantes blancos cumplen una doble función en la mejora del desempeño térmico de las losas de concreto: actúan como barrera contra la humedad y como superficie reflectante de la radiación solar. Este tipo de recubrimientos está formulado con componentes que presentan un alto albedo, como resinas acrílicas o elastómericas mezcladas con pigmentos blancos, generalmente dióxido de titanio (TiO₂).

Diversos estudios han corroborado su eficacia. Por ejemplo, Akbari et al. (2001) destacan que techos cubiertos con impermeabilizantes blancos pueden presentar una reducción de hasta 20 °C en su temperatura superficial, en comparación con techos

convencionales. Esta estrategia es especialmente relevante en zonas de alta insolación, ya que permite una mejora inmediata con una intervención de bajo costo relativo.

Además, los impermeabilizantes blancos pueden extender la vida útil del concreto al reducir las variaciones de temperatura, disminuyendo la frecuencia de aparición de fisuras superficiales.

Vegetación en Techos. La instalación de sistemas de techos verdes o ajardinados son una estrategia bioclimática que ofrece múltiples beneficios térmicos, acústicos y ambientales. En el caso de la reducción de temperatura en losas de concreto, la vegetación actúa como una barrera térmica natural que disminuye la ganancia de calor mediante la evapotranspiración y el sombreado de la superficie.

Según Wong et al. (2003), los techos verdes pueden reducir la temperatura de la losa subyacente entre 10 y 20 °C, dependiendo de la configuración del sistema, el tipo de vegetación y las condiciones climáticas locales. Este efecto es particularmente notable en sistemas extensivos con especies vegetales de bajo mantenimiento. Además de mejorar el confort térmico interior, los techos verdes contribuyen a la gestión de aguas pluviales, la biodiversidad urbana y la mejora de la calidad del aire. Su implementación requiere considerar aspectos estructurales, ya que se añade una carga adicional al edificio, además de requerir sistemas adecuados de drenaje e impermeabilización.

La implementación de estrategias pasivas como el uso de materiales reflectantes, aislamiento térmico, impermeabilizantes blancos y sistemas de vegetación en techos ha demostrado ser eficaz para reducir la temperatura superficial y la transferencia de calor a través de las losas de concreto en climas cálidos. Estas soluciones, si bien presentan diferentes niveles de complejidad técnica y económica, coinciden en su objetivo común:

disminuir la carga térmica que incide sobre las edificaciones y mejorar el confort térmico interior sin recurrir a sistemas activos de climatización.

El éxito de cada estrategia depende de factores como la orientación solar, el tipo de edificación, el comportamiento higrotérmico de los materiales y las condiciones climáticas específicas del sitio. En el contexto de una arquitectura adaptativa y resiliente frente al cambio climático, la elección e integración adecuada de estas medidas puede contribuir significativamente a la eficiencia energética de los edificios y a la sostenibilidad urbana.

Para comprender con mayor profundidad el comportamiento térmico de los techos de concreto armado en regiones cálidas, es necesario analizar el fenómeno de la transferencia de calor por radiación. Este mecanismo, directamente relacionado con la energía solar que incide sobre la superficie del techo, tiene un impacto significativo en el incremento de la temperatura tanto de la losa como del espacio interior del edificio. La radiación solar es una de las principales fuentes de ganancia térmica en climas cálidos, especialmente en techos expuestos sin sombreado ni tratamiento superficial.

4.2.3 Transferencia por Radiación

La transferencia de calor por radiación es el mecanismo predominante mediante el cual las superficies expuestas reciben energía térmica del sol. En climas cálidos como el de Culiacán Rosales, la radiación solar directa representa una fuente considerable de carga térmica para las edificaciones (Santamouris, 2014). La energía radiante incide sobre los techos, calentando las superficies expuestas y provocando un incremento progresivo de la temperatura interior por el fenómeno conocido como "ganancia térmica".

A diferencia de la conducción o la convección, la radiación térmica no requiere un medio material para propagarse; se transmite en forma de ondas electromagnéticas, principalmente en el espectro infrarrojo. Cuando esta radiación alcanza la superficie de una losa de concreto, parte de ella es reflejada, otra es absorbida y una fracción mínima puede ser transmitida dependiendo de las propiedades ópticas del material (Lechner, 2015). La fracción absorbida se convierte en calor, lo cual eleva la temperatura superficial de la cubierta, y, por ende, incrementa el flujo de calor hacia el interior del espacio habitable.

El grado de absorción depende de variables como el color, la textura y el albedo del material. Las superficies oscuras y rugosas tienden a absorber más radiación solar, mientras que las superficies claras y lisas reflejan una mayor proporción de energía (Akbari et al., 2001). Por ello, el control de la radiación solar mediante estrategias pasivas, como la selección de materiales reflectantes o la incorporación de techos verdes, cobra especial importancia en el diseño térmico de edificaciones en zonas de alta insolación.

Además, durante la noche, los techos expuestos también irradian energía hacia el cielo en un proceso conocido como enfriamiento radiactivo, aunque este efecto es generalmente menor que la ganancia térmica diurna. Sin embargo, en ambientes urbanos densamente construidos, la radiación reflejada entre edificios y el almacenamiento térmico en superficies masivas como el concreto contribuyen al fenómeno de isla de calor urbana, intensificando las temperaturas nocturnas (Oke, 1987).

En conclusión, la transferencia de calor por radiación constituye un fenómeno clave en la acumulación de calor en los techos expuestos, especialmente en zonas con alta

incidencia solar como Culiacán Rosales. Su comprensión es fundamental para el diseño de estrategias pasivas de mitigación térmica, ya que la radiación solar representa la principal fuente de ganancia energética durante el día. Por ello, el tratamiento adecuado de la envolvente arquitectónica y la elección de materiales con propiedades ópticas controladas son determinantes para reducir el impacto de la radiación sobre el confort térmico interior y el consumo energético asociado a la climatización.

Una vez analizados los principios físicos y las estrategias constructivas para reducir la transferencia de calor en techos de concreto armado, es necesario presentar el procedimiento experimental que permite evaluar su efectividad. Este apartado describe la metodología empleada para el monitoreo térmico de las losas con y sin sistema de cubierta verde, detallando tanto la disposición de los sensores como las condiciones bajo las cuales se llevó a cabo el registro de temperaturas.

El correcto diseño del procedimiento y la selección de los instrumentos de medición garantizan la confiabilidad de los datos obtenidos, los cuales constituyen la base empírica para comparar el comportamiento térmico de ambas soluciones constructivas. Se incluye la justificación técnica de los equipos utilizados, ubicación dentro del espacio experimental, así como la frecuencia y duración de las mediciones, asegurando así la validez de los resultados obtenidos.

4.3 Procedimiento e Instrumentación para el Registro de Temperaturas

Dado el diseño experimental de este estudio, que implicó la construcción de un techo verde sobre una losa de concreto armado y la comparación directa con un espacio de referencia bajo condiciones estructurales y dimensionales equivalentes, se estableció un protocolo específico de instrumentación. El propósito fue obtener registros confiables y comparables de temperatura superficial y ambiente interior. Para ello, se instalaron

sensores de contacto y equipos registradores de temperatura y humedad, cuya disposición fue cuidadosamente controlada durante todo el periodo de monitoreo (Getter & Rowe, 2006; Jiménez et al., 2011).

La temperatura y humedad relativa son un factor importante que debemos considerar tanto en espacios interiores como exteriores, para el análisis comparativo se tomaron en cuenta los registros de temperatura y humedad relativa ambiental registrados en la estación Climatológica ubicada en la Facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa, la información (archivos de Excel) fue proporcionada por el Dr. Bladimir Salomón Montijo, quien es responsable de la estación. Véase (Anexo 2)

4.3.1 Condiciones Climáticas Durante el Periodo de Monitoreo

Durante el periodo comprendido entre el 21 de marzo y el 21 de abril de 2025, se realizó un seguimiento horario de las condiciones climáticas locales con base en los registros proporcionados por una estación meteorológica automatizada ubicada en Culiacán, Sinaloa. Las variables consideradas fueron la temperatura ambiente ($^{\circ}\text{C}$), la radiación solar incidente (W/m^2) y la humedad relativa del aire (%), con un intervalo de registro de una hora, durante las 24 horas del día.

Los datos analizados revelan que las temperaturas promedio diarias oscilaron entre los 20.1°C y los 28.1°C , mostrando un incremento progresivo asociado con la transición hacia el periodo más cálido del año. La radiación solar se mantuvo alta a lo largo del mes alcanzando valores por encima de los $800 \text{ W}/\text{m}^2$, lo cual se puede ver en anexos, mientras que la humedad relativa presentó variaciones moderadas entre el 50 % y el 70 %, lo que sugiere una condición atmosférica típicamente seca durante las horas de máxima insolación.

El 15 de abril fue identificado como el día con la temperatura más elevada, alcanzando un promedio diario de 28.14 °C, mientras que el 5 de abril presentó el promedio térmico más bajo (20.12 °C). Estos días fueron seleccionados como representativos para el análisis comparativo debido a sus condiciones extremas dentro del rango observado. Se grafican ambos días para mostrar a detalle una comparación entre las losas y el interior de los espacios.

Estudios recientes demuestran la relevancia de estas variables sobre la eficacia de los techos verdes. Por ejemplo, en experimentos realizados en clima cálido-seco, un prototipo de techo verde redujo la temperatura interna de bulbo seco en casi 4 °C y presentando una mayor inercia térmica frente a superficies convencionales (Rodríguez et al., 2024). Además, un metaanálisis sobre regiones mediterráneas resaltó que el diseño y la composición de los sustratos vegetados inciden significativamente en la capacidad de aislamiento térmico (De Cristo et al., 2025).

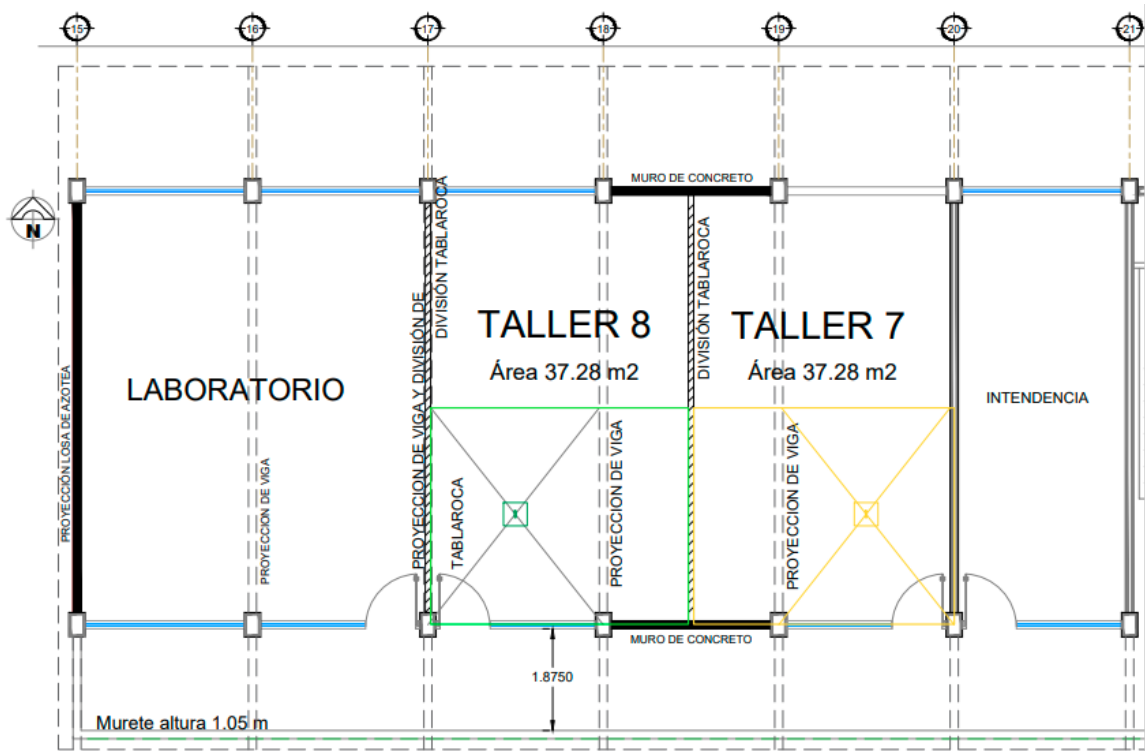
4.3.2 Disposición y Metodología de Monitoreo Térmico en los Espacios Evaluados

Con el objetivo de analizar el comportamiento térmico interior de dos espacios con características constructivas similares; uno con losa cubierta por un sistema de techo verde semi-intensivo y otro con losa convencional de concreto armado expuesta, se implementó un sistema de monitoreo basado en registradores de datos HOBO MX1104. Estos dispositivos permiten la medición continua de temperatura del aire y humedad relativa, con una exactitud de ± 0.20 °C en el rango de 0 °C a 50 °C, y una resolución de hasta 0.002 °C a 25 °C. En cuanto a humedad, su exactitud típica es de ± 2.5 % entre el 10 % y el 90 % de HR, con resolución de 0.01 % (Onset, 2023).

Los sensores se colocaron al interior de cada aula, adheridos a la estructura metálica del plafón, a una distancia de aproximadamente 40 cm por debajo de la losa, en el centro geométrico del espacio. Para obtener lecturas más precisas sobre el flujo térmico procedente del techo, se integró una sonda de temperatura superficial conectada al registrador, fijada directamente a la cara inferior de la losa en el centro geométrico entre las vigas y tomando en cuenta que corresponde a la mitad del aula, en el recuadro verde para el techo verde taller ocho y el recuadro amarillo para el espacio testigo taller siete, véase Figura 51.

Figura 51

Ubicación de sondas, en superficie interior de las losas



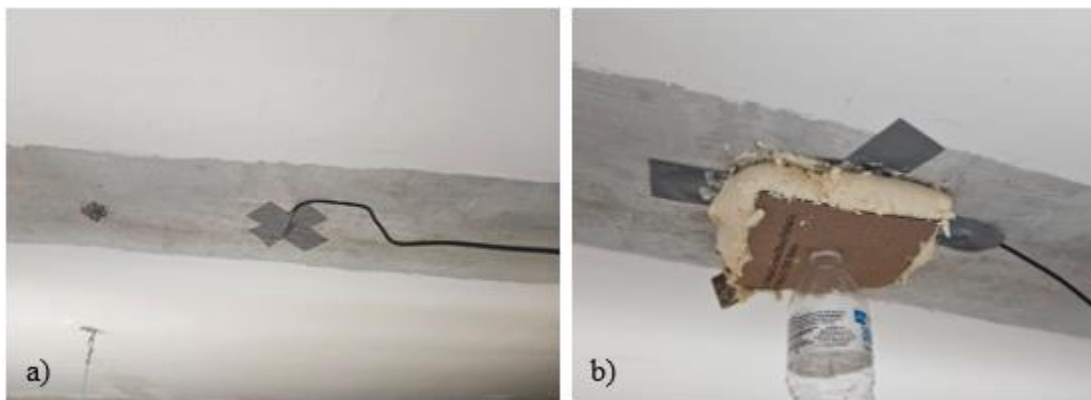
Esta sonda cuenta con un rango de medición de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y una exactitud de $\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que permite una lectura confiable de la temperatura superficial bajo condiciones reales. Para reducir la influencia del ambiente interior y

mejorar la focalización del sensor en la transferencia de calor desde la losa, se aplicó una capa de aislamiento de poliuretano expandido en torno al punto de contacto.

Las sondas fueron colocadas pegadas al interior de las losas, se aplicó una capa de aislante: espuma de poliuretano para que el equipo genere el registro con mayor precisión solo de la temperatura recibida por contacto que se está transfiriendo a través de la losa de concreto, véase Figura 52.

Figura 52

Colocación de sonda en parte inferior de las losas



Nota. a) primero se fija la sonda con cinta gris, colocando dos capas, b) Capa de poliuretano como aislante térmico, con eso se asegura que la sonda solo genere registro de la temperatura de las losas.

Los registros se realizaron durante un periodo continuo de 32 días, del 21 de marzo al 21 de abril de 2025, con una frecuencia de una medición por hora durante las 24 horas del día. Esta estrategia permitió capturar las oscilaciones térmicas diarias completas y obtener un panorama representativo del desempeño térmico bajo un clima cálido seco característico de Culiacán, Sinaloa.

Ambos espacios seleccionados cuentan con condiciones comparables en cuanto a dimensiones, orientación, materiales de construcción y uso, lo que garantiza la validez del análisis comparativo. La única diferencia entre ambos es la implementación del

sistema de techo verde, lo que permite atribuir las variaciones térmicas observadas directamente a esta intervención arquitectónica.

Diversas investigaciones confirman que los techos verdes, además de reducir ganancias térmicas, estabilizan las condiciones interiores en contextos reales de clima cálido. Por ejemplo, Jaffal et al. (2012) documentan efectos efectivos de reducción térmica y ahorro energético en edificaciones reales equipadas con cubierta vegetal en zonas cálidas. Más recientemente, un estudio experimental comparativo con dos edificaciones idénticas demostró una reducción promedio de 6.8 °C en la temperatura máxima interior en la habitación con techo verde (Hong & Kim, 2023). Estas evidencias refuerzan la validez de los datos obtenidos en el presente estudio medidos en condiciones reales de Culiacán y respaldan el análisis comparativo que se desarrolla en los resultados.

Capítulo V

Resultados Experimentales y Conclusiones

Este apartado presenta los resultados obtenidos a partir del monitoreo térmico realizado en dos aulas con características constructivas similares, una equipada con un sistema de techo verde y otra con losa convencional de concreto armado. El análisis se enfoca en las variables de temperatura superficial de las losas, temperatura interior y humedad relativa, registradas con instrumentos de alta precisión durante un periodo continuo de 32 días, con mediciones horarias durante las 24 horas del día.

El propósito de esta sección es comparar el comportamiento térmico de ambos espacios bajo condiciones reales de clima cálido seco, a fin de evaluar el desempeño del techo verde como estrategia pasiva de mitigación térmica. Para ello, se seleccionaron días representativos con base en criterios empíricos, considerando extremos térmicos tanto a nivel ambiental como al interior de los espacios, con el objetivo de evidenciar las diferencias más significativas entre la losa con techo verde y la convencional.

5.1 Criterio de Selección de Días Representativos

Para realizar un análisis detallado y comprensible del comportamiento térmico en los espacios evaluados, se seleccionaron cuatro días representativos del periodo de monitoreo comprendido entre el 21 de marzo y el 21 de abril de 2025. La selección de estos días se realizó de forma empírica, a partir del análisis directo de los registros horarios obtenidos tanto en la estación climatológica local como en los sensores de temperatura y humedad instalados al interior de los espacios con losa convencional y con techo verde.

Este enfoque cuasiexperimental se basa en la práctica ampliamente documentada en estudios previos de techos verdes, donde es común analizar datos de días soleados

representativos para evaluar el comportamiento térmico del sistema. Por ejemplo, Tang y Zheng (2019) realizaron un monitoreo en días consecutivos durante verano, seleccionando jornadas sin precipitaciones y con alta radiación solar para calcular índices térmicos como la resistencia equivalente y el factor de decremento térmico; reportaron diferencias de hasta 1.8 °C por debajo de la temperatura exterior y 0.9 °C por debajo de la interior en la interfaz sustrato-estructura. Basándonos en este tipo de enfoque, se seleccionaron cuatro días del mes de abril, para realizar un análisis detallado y comprensible del comportamiento térmico en los espacios evaluados.

Así pues, se seleccionaron cuatro días representativos del periodo de monitoreo comprendido entre el 21 de marzo y el 21 de abril de 2025. Los días 5 y 15 de abril fueron identificados a partir de los registros de la estación climatológica ubicada en la facultad de biología de la UAS, con base en los valores promedio diarios de temperatura y humedad relativa del ambiente. El 5 de abril correspondió al día con menor temperatura ambiente promedio del periodo, mientras que el 15 de abril registró la temperatura ambiente más elevada, lo que permite contrastar el desempeño térmico de los techos expuestos en condiciones climáticas opuestas.

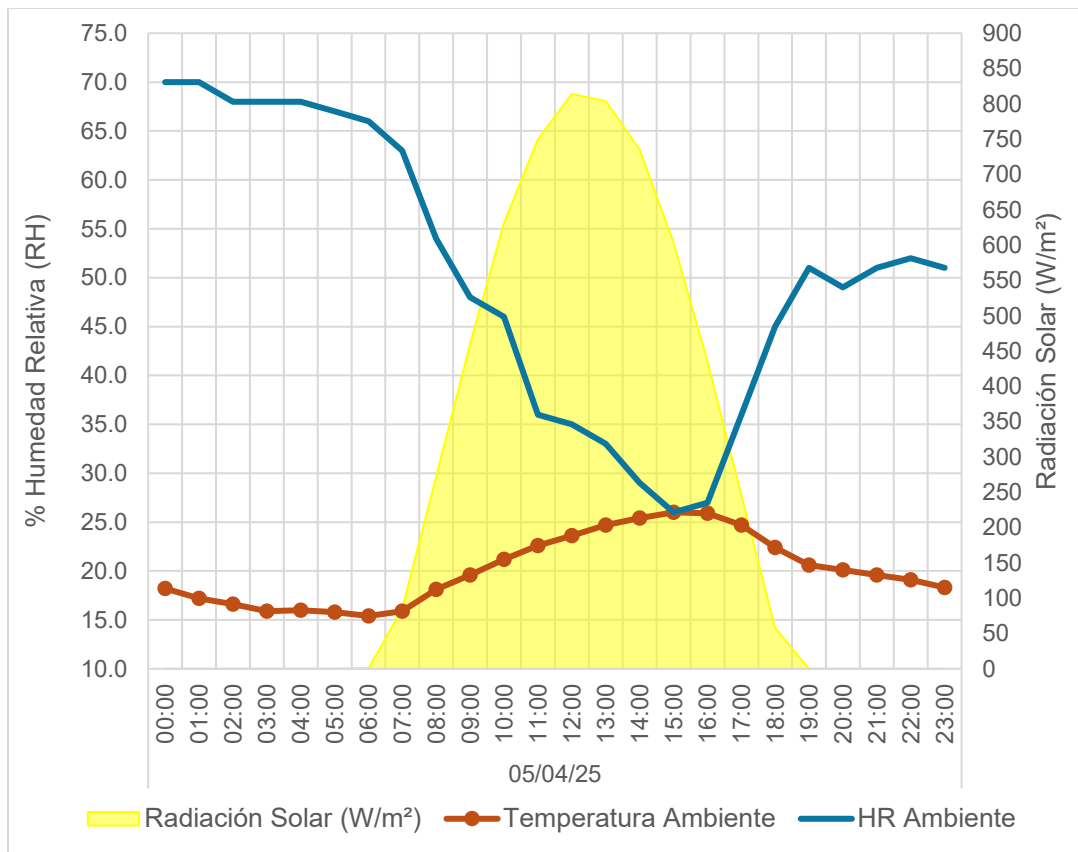
Por otra parte, los días 6 y 16 de abril fueron seleccionados con base en los registros interiores obtenidos por los sensores colocados en el aula con techo convencional. El 6 de abril presentó la temperatura interior promedio más baja, y el 16 de abril la más alta, lo que permite analizar cómo responde térmicamente cada espacio bajo condiciones de mayor y menor carga térmica acumulada al interior.

5.1.1 Día con Menor Temperatura Ambiental: 5 de abril de 2025

El 5 de abril de 2025 fue el día con la menor temperatura ambiental durante el periodo de monitoreo, registrándose una mínima de 15.4 °C a las 06:00 h y una máxima de 26.0 °C a las 15:00 h. La radiación solar alcanzó su valor máximo a las 12:00 h con 814 W/m², a pesar del ambiente relativamente templado, generó un impacto térmico notable sobre los techos de concreto armado expuestos. La humedad relativa ambiente osciló entre un 26 % y un 70 %, con valores mínimos durante las horas de mayor insolación, véase Figura 53.

Figura 53

Temperatura, humedad relativa ambiente y radiación solar 5 de abril

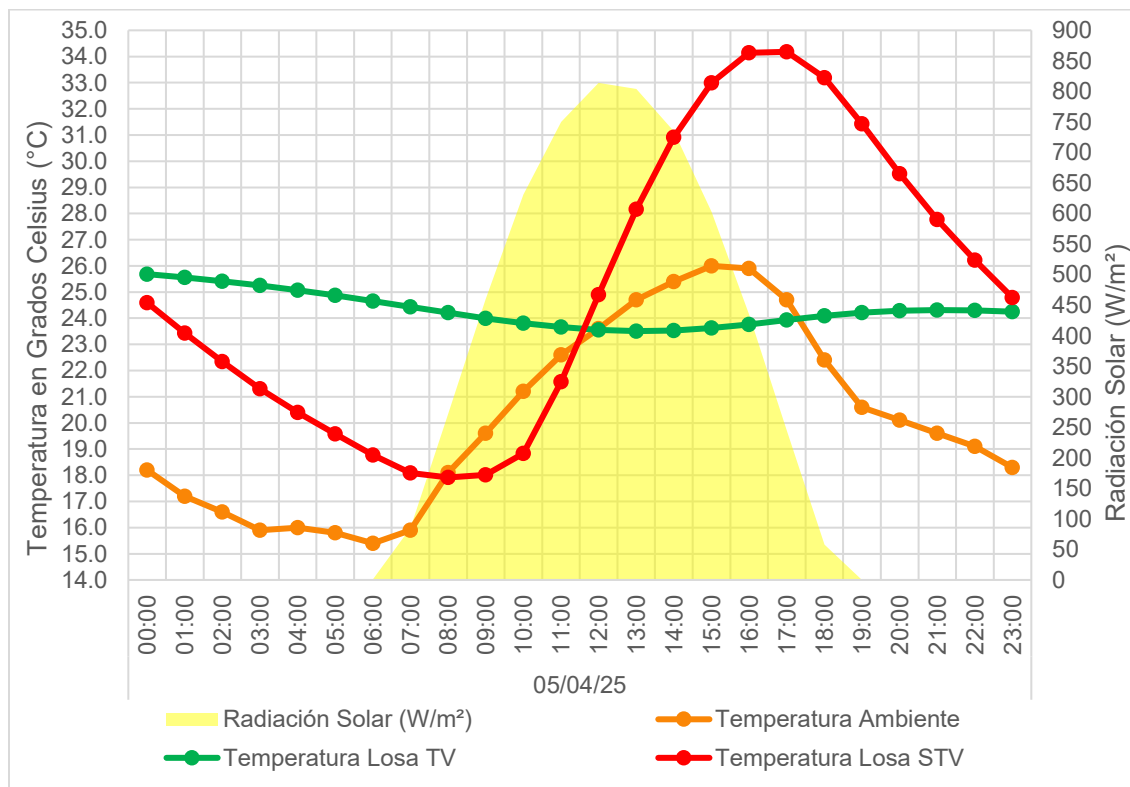


Nota. Grafica generada en Excel, tomando en cuenta base de datos de la estación climatológica de la UAS.

En este contexto, la temperatura superficial de la losa convencional (STV) alcanzó los 34.2 °C a las 17:00 h, mientras que la losa con techo verde (TV) presentó un máximo de 24.3 °C entre las 21:00 y 23:00 h, evidenciando una diferencia de hasta 9.9 °C atribuible a la capacidad de aislamiento térmico del sistema vegetal. Este comportamiento es notable considerando que la temperatura ambiente osciló entre una mínima de 15.4 °C a las 06:00 h y una máxima de solo 26.0 °C, lo que sugiere que el techo verde no solo mitiga la ganancia térmica en condiciones extremas, sino que también funciona eficazmente bajo temperaturas moderadas, proporcionando beneficios térmicos consistentes a lo largo de distintas condiciones climáticas, véase Figura 54.

Figura 54

Temperatura superficial interior de losas y ambiental 5 de abril

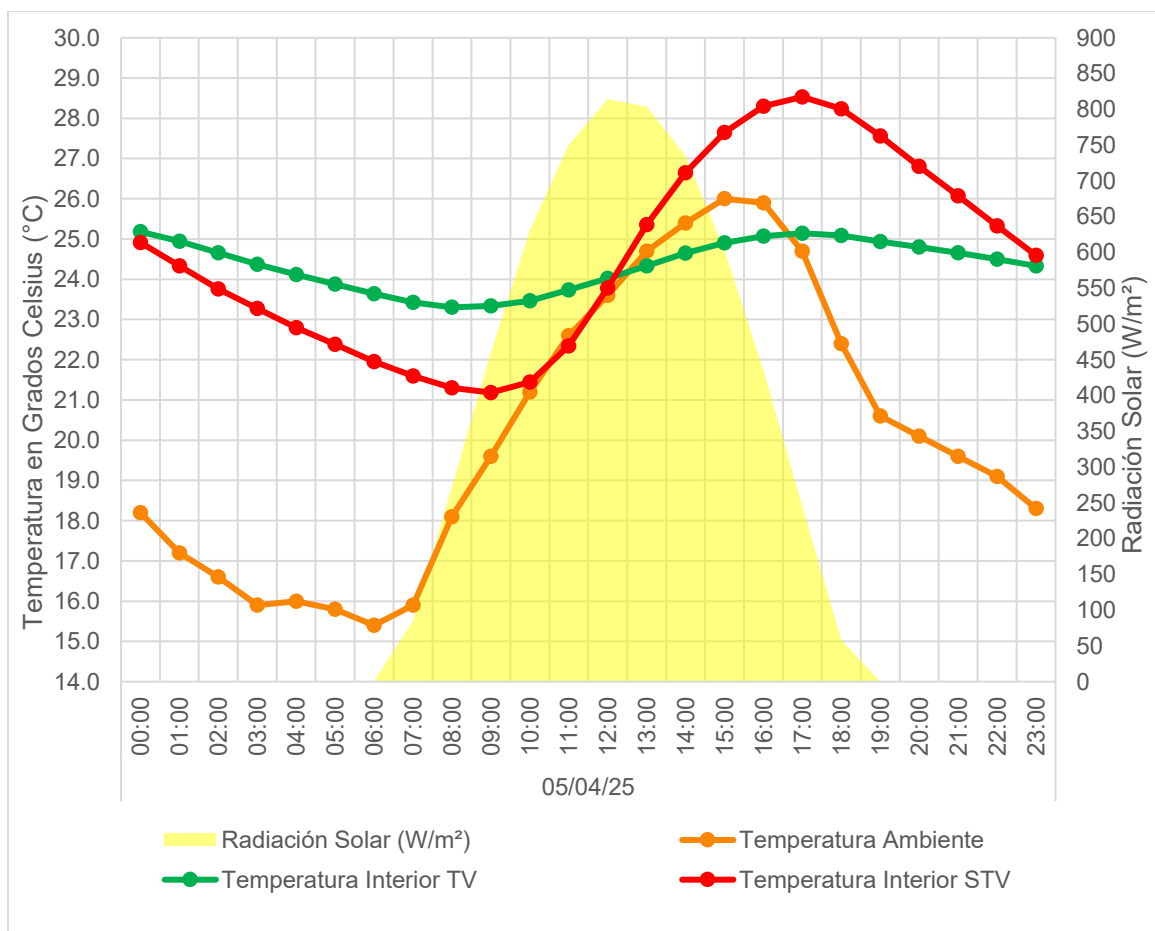


Nota. Gráfica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

Respecto a la temperatura interior, el aula con STV alcanzó su pico térmico a las 17:00 h con 28.5 °C, mientras que el espacio con techo verde mantuvo una temperatura máxima de 25.1 °C entre las 16:00 y 18:00 h, véase Figura 55. Esta diferencia de hasta 3.4 °C demuestra la eficacia del techo verde para moderar las ganancias térmicas interiores y mantener condiciones más cercanas al rango de confort térmico.

Figura 55

Temperatura interior de espacios 05 de abril

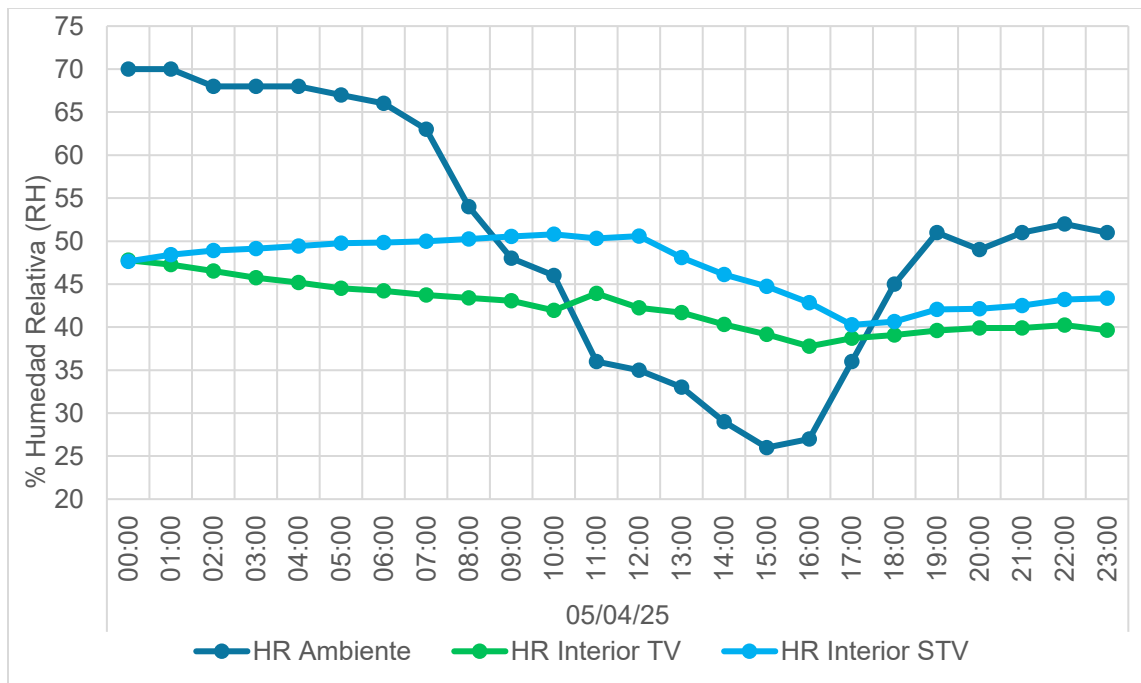


Nota. Grafica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

En términos de humedad relativa, la variabilidad de la RH ambiente también tuvo un papel importante en el desempeño térmico observado. Durante el 5 de abril, la humedad relativa ambiente osciló entre un 70 % en horas de la madrugada y un 26 % en el periodo de máxima radiación solar. Esta reducción de humedad, sumada al aumento térmico de la losa expuesta, provocó un entorno interior menos confortable en comparación con el aula equipada con techo verde, el aula con techo verde mantuvo valores más estables 39–48 % frente al aula con STV 40–51 %, con diferencias de hasta 9 % en ciertos momentos del día, véase Figura 56.

Figura 56

Humedad relativa interior de espacios 05 de abril



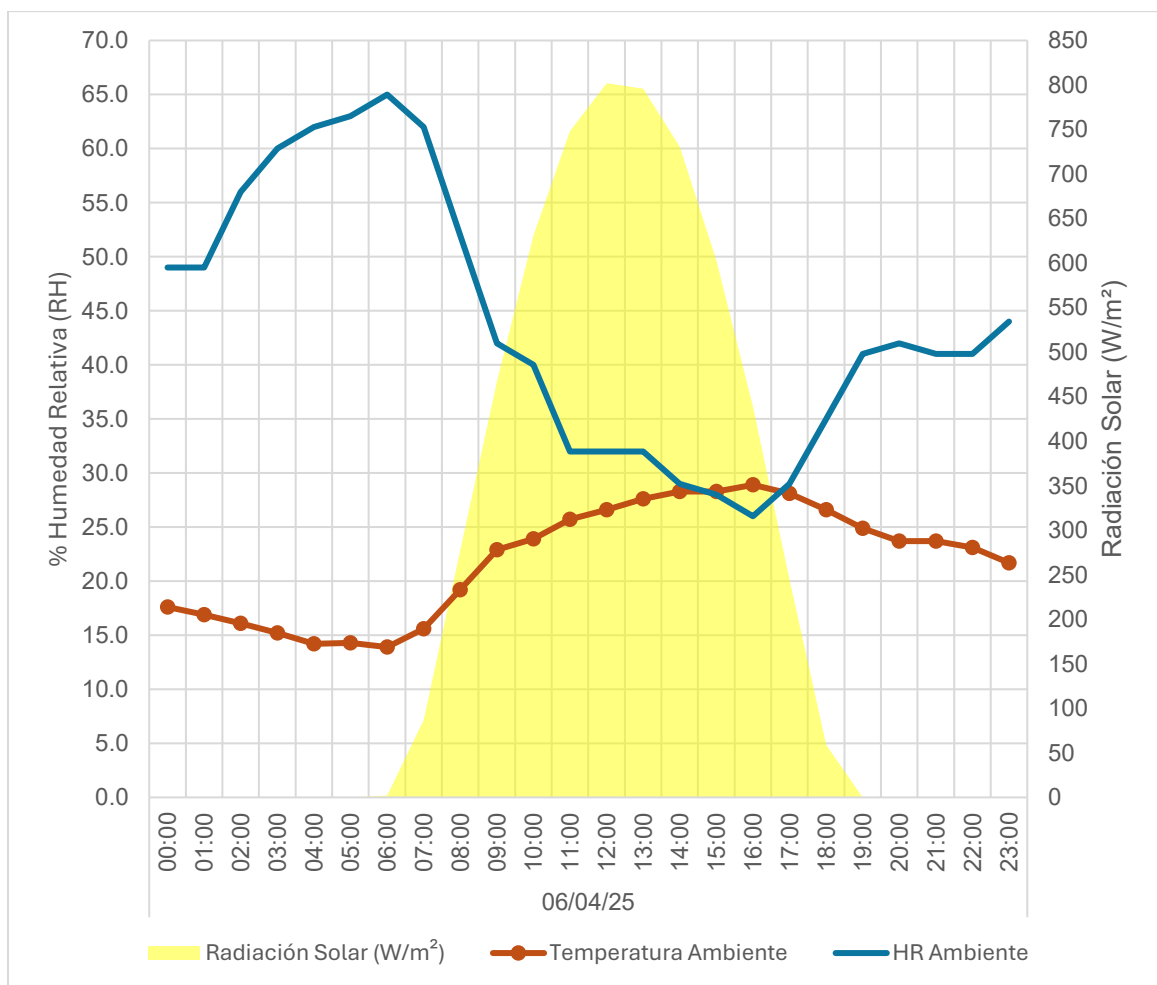
Los datos del día 05 de abril reflejan que, incluso en días con menor carga térmica ambiental, el techo verde contribuye significativamente a la reducción de la temperatura superficial e interior, validando su función como estrategia pasiva de mitigación térmica en zonas urbanas con clima árido cálido.

5.1.2 Día con Menor Temperatura Interior: 6 de abril de 2025

La temperatura ambiente durante ese día osciló entre los 16.0 °C a las 06:00 h y 27.2 °C a las 14:00 h, mientras que la radiación solar alcanzó su pico máximo de 802 W/m² a las 12:00 h. La humedad relativa ambiental varió entre 68 % en la madrugada y 28 % en las horas de mayor insolación, véase Figura 57.

Figura 57

Temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar 06 de abril

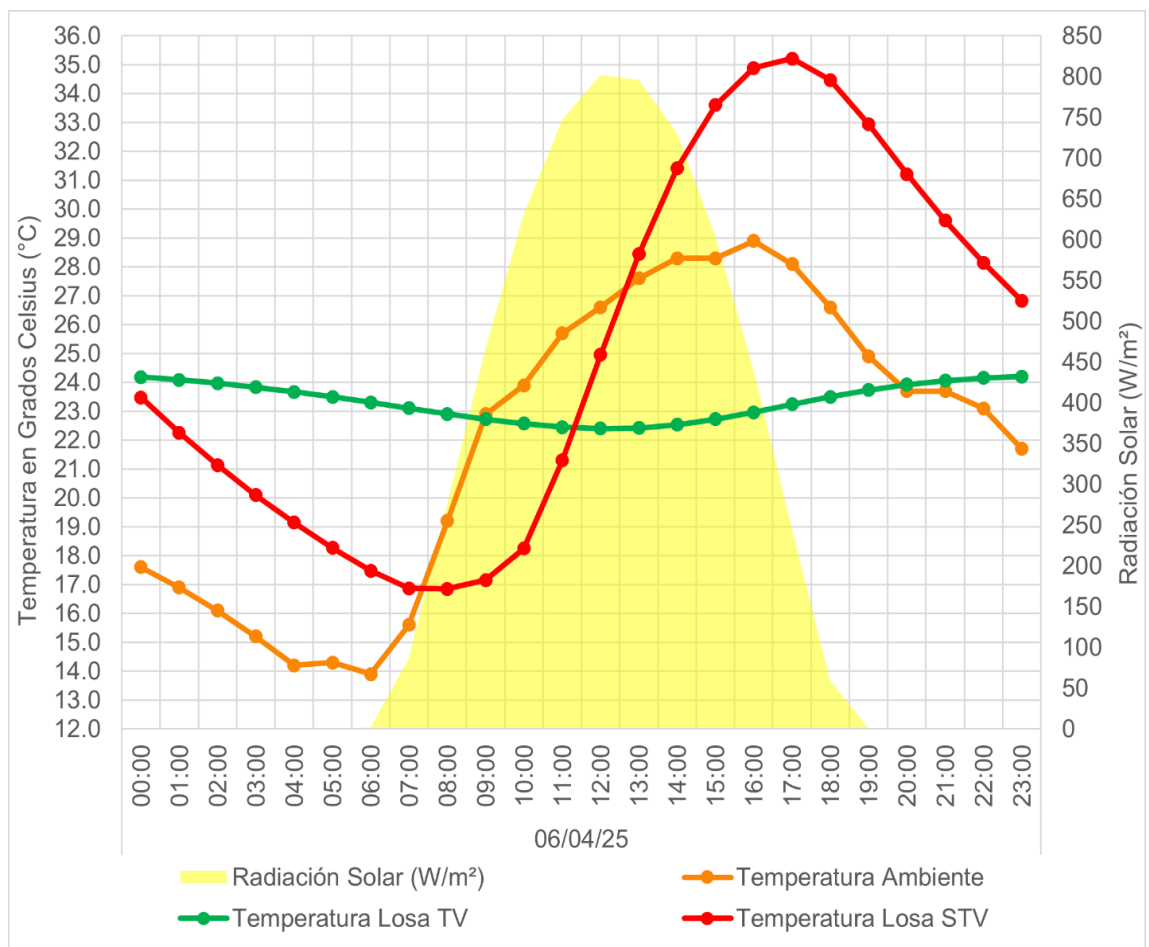


Nota. Gráfica generada en Excel, tomando en cuenta base de datos de la estación climatológica de la UAS.

A nivel de temperatura superficial de las losas, la cubierta STV registró un máximo de 34.8 °C a las 16:00 h, mientras que la losa con TV alcanzó solo 24.1 °C a las 21:00 h. Esta diferencia de 10.7 °C confirma nuevamente el efecto amortiguador del techo verde frente a la radiación solar directa, especialmente en un día donde la intensidad de radiación fue considerable, alcanzando los 830 W/m² al mediodía, véase Figura 58.

Figura 58

Temperatura superficial interior de losas 06 de abril

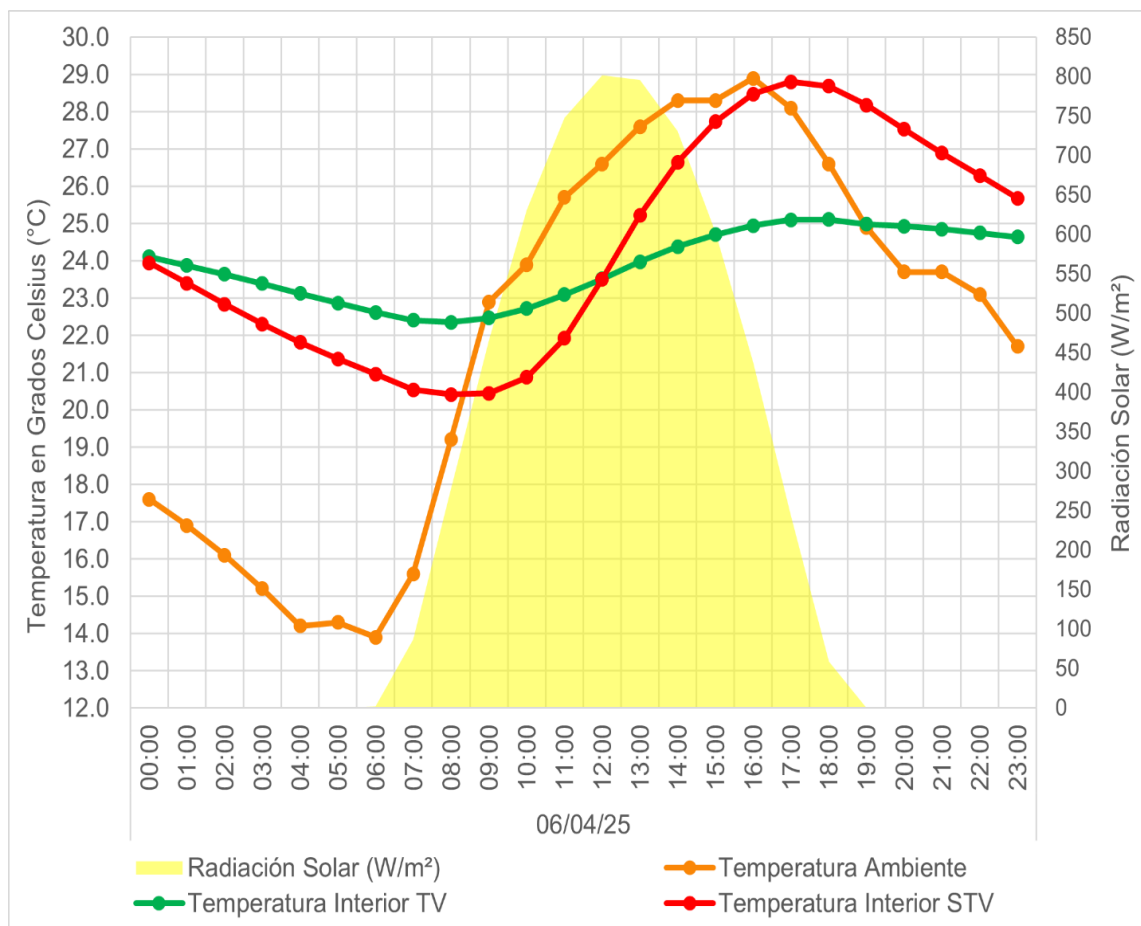


Nota. Gráfica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

En cuanto al comportamiento térmico interior, el aula con STV presentó una temperatura máxima de **28.8 °C** entre las 17:00 y 18:00 h, mientras que el espacio con techo verde se mantuvo en un rango máximo de **24.9 °C**, marcando una **diferencia de casi 4 °C**, el espacio interior con TV mantuvo una temperatura más estable contrario lo que sucede con el espacio STV la cual una vez que absorbe el calor producto de la radiación conserva el calor por varias horas, véase Figura 59.

Figura 59

Temperatura interior de espacios 06 de abril

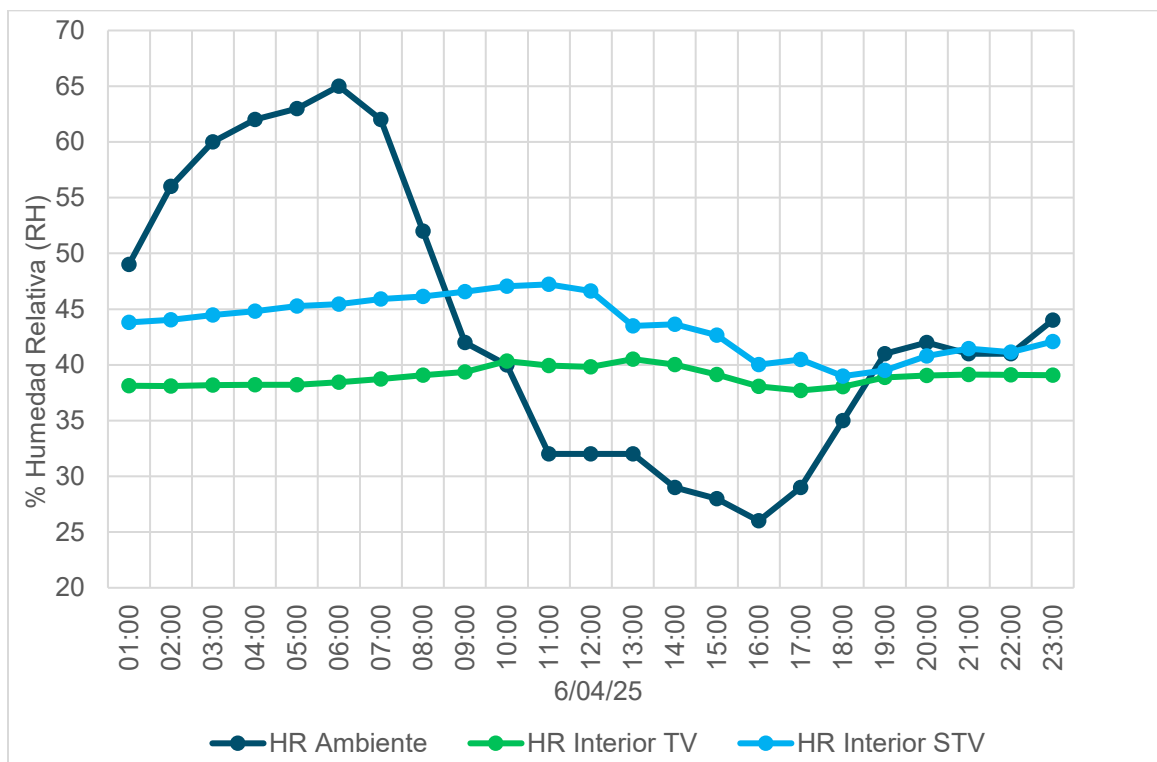


Nota. Gráfica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

En términos de humedad relativa, el aula con TV mantuvo una mayor estabilidad con valores entre 44 % y 48 %, frente al aula con STV que presentó una fluctuación entre 40 % y 51 %, la diferencia promedio durante las primeras 12 horas del día oscila entre el 6% y 7%, véase Figura 60. Este comportamiento reafirma la capacidad del techo verde para modular las condiciones interiores, no solo en términos de temperatura sino también en humedad, lo que puede favorecer una percepción térmica más confortable para los ocupantes.

Figura 60

Humedad relativa 06 de abril 2025



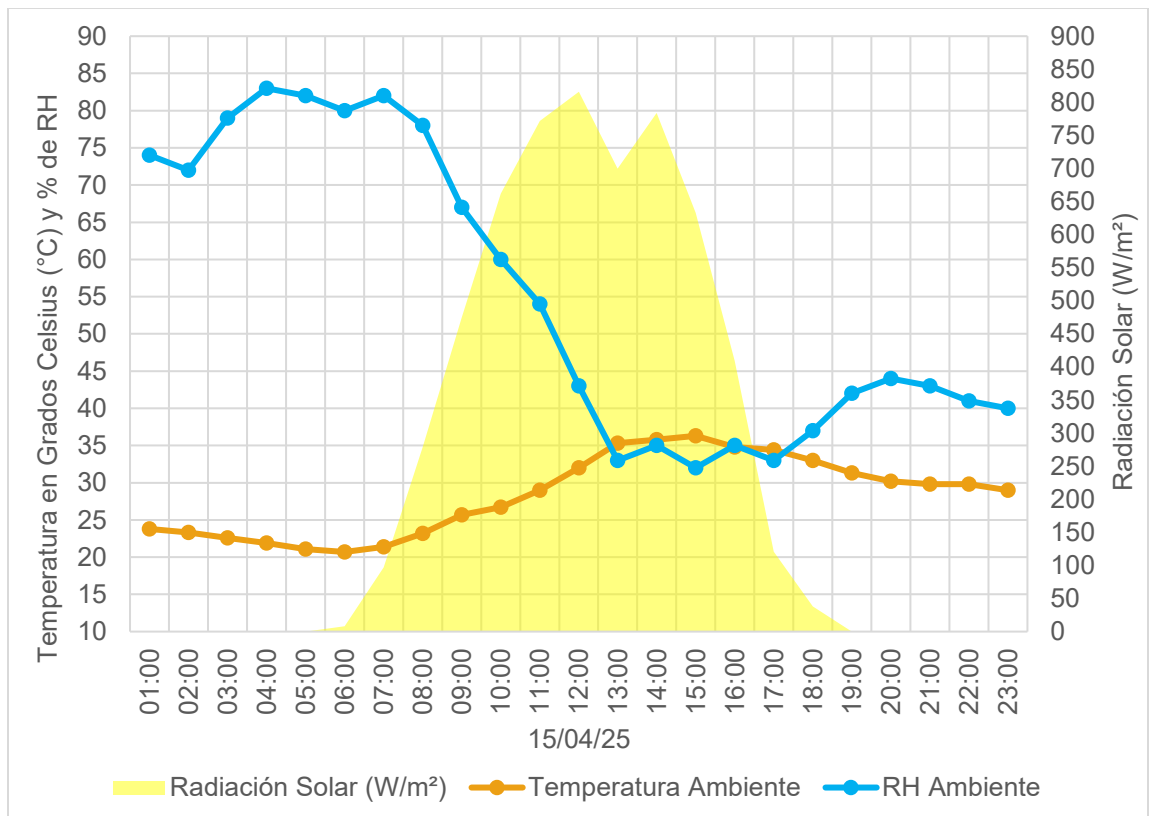
El 6 de abril de 2025 se identificó como el día con la menor temperatura interior registrada en el espacio equipado con (TV), alcanzando un mínimo de 21.6 °C a las 07:00 h. A esta misma hora, la temperatura interior del espacio con losa convencional (STV) fue de 23.4 °C, mostrando una diferencia de **1.8 °C** en favor del sistema pasivo Techo Verde.

5.1.3 Día con Mayor Temperatura Ambiental: 15 de abril de 2025

El 15 de abril de 2025 se registró la mayor temperatura ambiental del periodo de monitoreo, con un pico térmico de 36.3 °C a las 15:00 h, acompañado de una radiación solar máxima de 816 W/m² a las 12:00 h. La mínima temperatura ambiente del día fue de 20.7 °C a las 06:00 h, lo que revela una amplitud térmica considerable, véase Figura 61. Esta combinación de alta radiación y temperatura generó una carga térmica significativa sobre los techos de concreto, afectando tanto las temperaturas superficiales como las condiciones interiores.

Figura 61

Temperatura, humedad relativa y radiación solar del 15 de abril

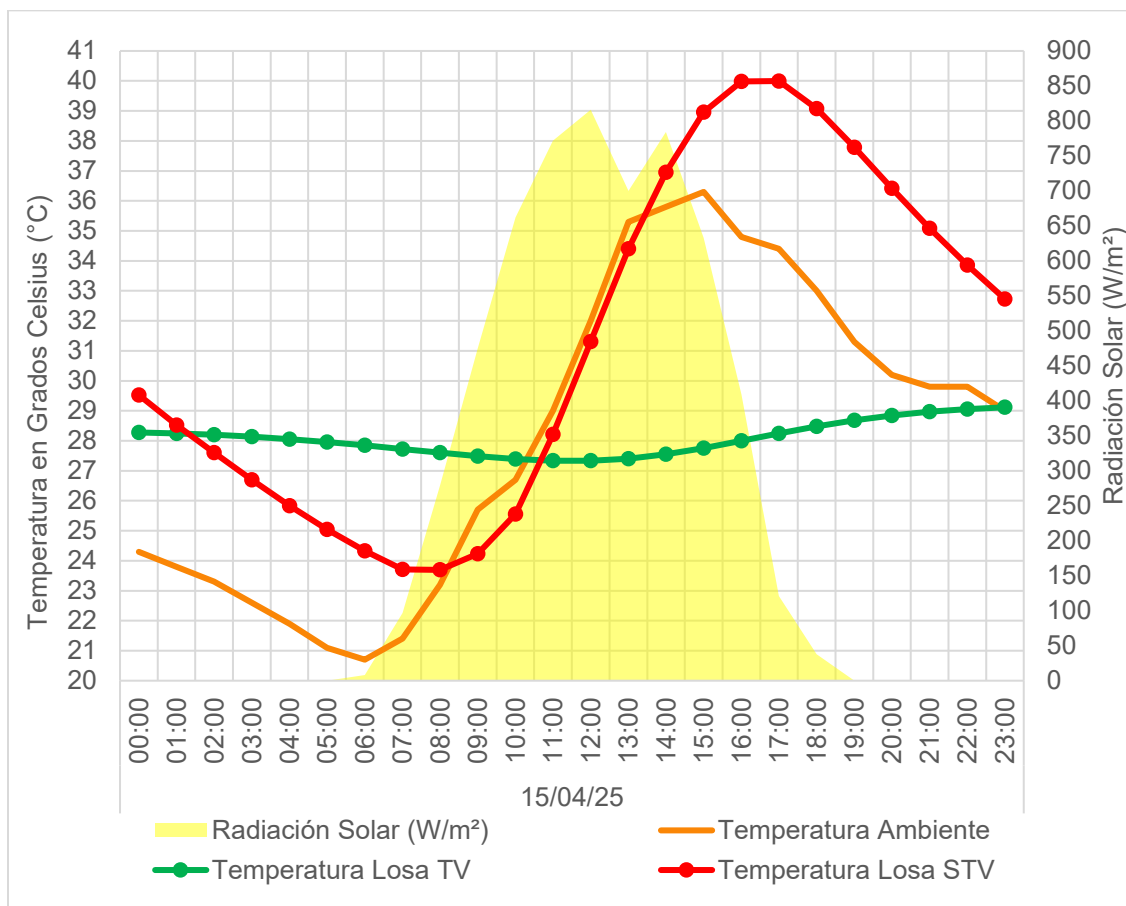


Nota. Gráfica generada en Excel, tomando en cuenta base de datos de la estación climatológica de la UAS.

Para el día 15 de abril el comportamiento térmico en las losas se registró de la siguiente manera; sin cubierta vegetal (STV) alcanzó su mayor temperatura superficial a las 16:00 y 17:00 h, con un valor máximo de **40.0 °C**, mientras que la losa con techo verde (TV) marco **27.3 °C** a las 12:00 horas y no superó los **29.1 °C**, evidenciando una diferencia máxima de **10.9 °C** en favor del sistema con vegetación, véase Figura 62. Esta diferencia resalta la capacidad del techo verde para atenuar los efectos de la radiación solar directa, incluso bajo condiciones climáticas extremas.

Figura 62

Temperatura superficial interior en losas 15 de abril 2025

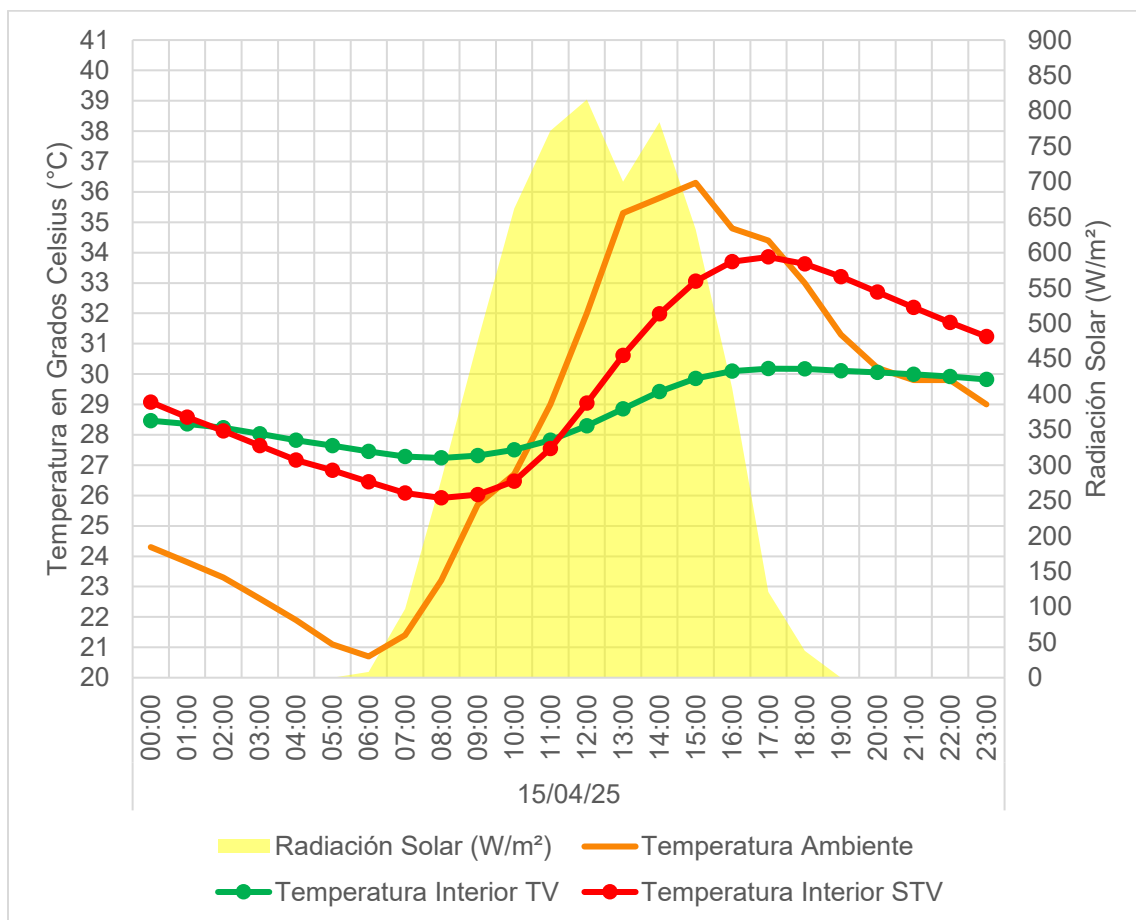


Nota. Grafica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

En cuanto a la temperatura interior para el día 15 de abril, el aula con STV presentó su valor más elevado a las 17:00 h, alcanzando los **33.9 °C**. En contraste, el aula con techo verde alcanzó un máximo de **30.2 °C** entre las 16:00 y 18:00 h. Aunque este valor también se encuentra fuera del rango óptimo, **la diferencia de hasta 3.7 °C** respecto al aula convencional representa una mejora significativa en términos de confort térmico, véase Figura 63.

Figura 63

Temperatura interior de espacios 15 de abril 2025

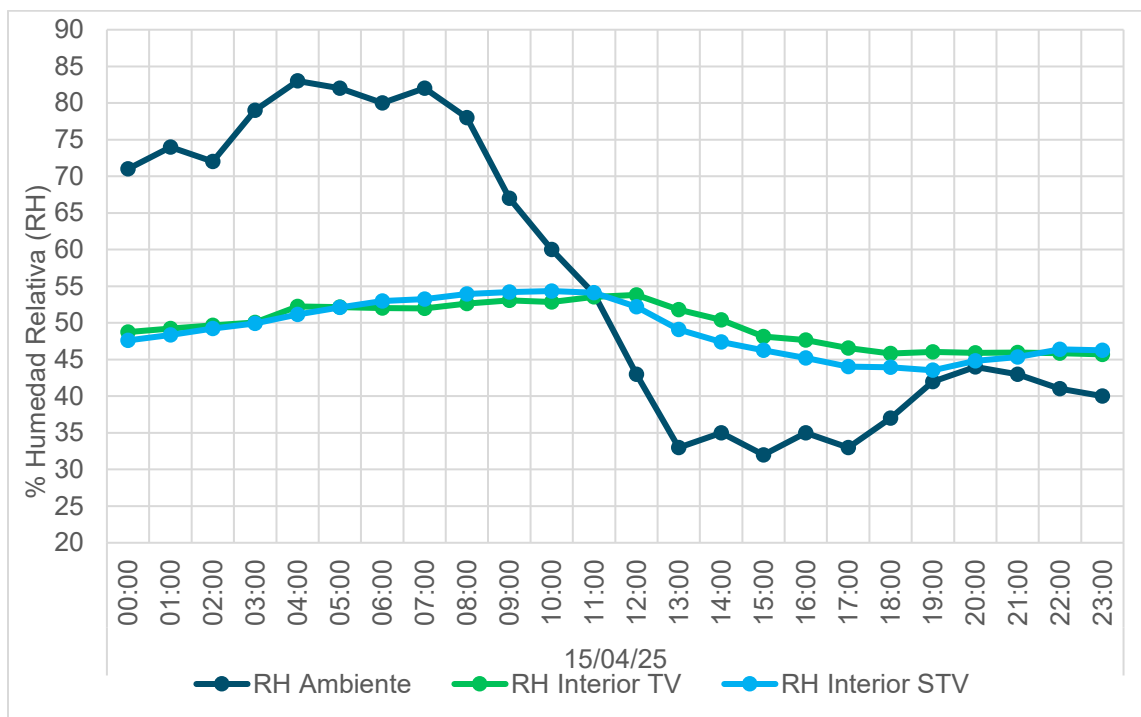


Nota. Grafica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

Respecto a la humedad relativa ambiente para el día 15 de abril se mostró una disminución progresiva conforme aumentaba la temperatura, bajando desde **82 %** en la madrugada hasta **32 %** en las horas de mayor insolación, lo que limitó el efecto de enfriamiento evaporativo, especialmente en el aula STV. La humedad relativa interior en el aula con techo verde se mantuvo más estable 46–54 %, mientras que en el aula convencional varió entre 44 % y 54 %, véase Figura 64.

Figura 64

Humedad relativa ambiente e interior de espacios 15 de abril 2025



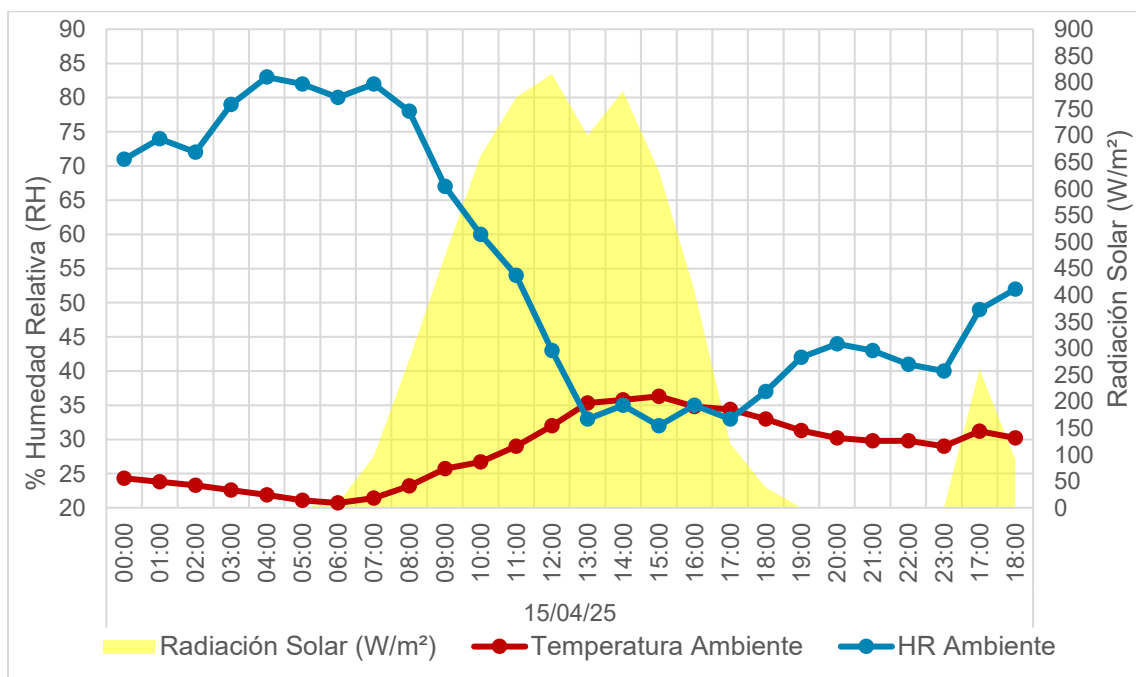
Estos resultados confirman que, bajo condiciones ambientales extremas, el techo verde actúa como una barrera térmica eficaz, amortiguando el impacto de la radiación solar sobre la losa y reduciendo la temperatura interior.

5.1.4 Día con Mayor Temperatura Interior: 16 de abril de 2025

El 16 de abril de 2025 se caracterizó por condiciones climáticas severas propias de un clima cálido seco. La temperatura ambiente osciló entre una mínima de 23.3 °C a las 06:00 h y una máxima de 31.8 °C a las 16:00 h, manteniéndose por encima de los 30 °C durante más de ocho horas consecutivas del día. En cuanto a la radiación solar, se registraron niveles significativos desde las primeras horas de la mañana, alcanzando un valor máximo de 817 W/m² a las 12:00 h, seguido de altos niveles durante el periodo crítico entre las 10:00 y 15:00 h, con más de 600 W/m² sostenidos. La humedad relativa ambiente presentó valores moderados a bajos, oscilando entre un mínimo de 42 % a las 00:00 h y un máximo de 75 % a las 23:00 h, con una marcada disminución durante las horas de mayor radiación solar, alcanzando apenas un 48 % entre las 10:00 y 13:00 h, véase Figura 65.

Figura 65

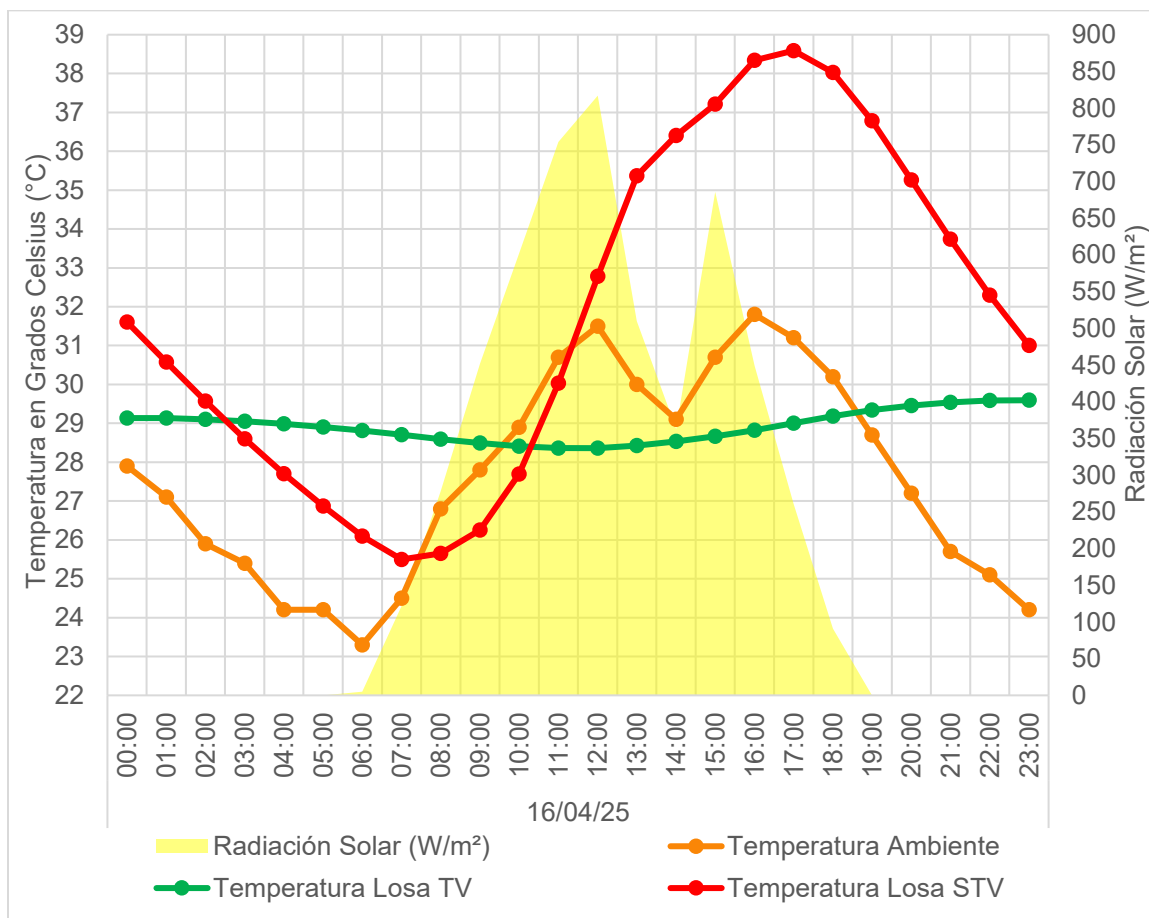
Temperatura ambiente, humedad relativa y radiación solar 16 abril



En este contexto, la losa sin vegetación STV alcanzó su temperatura máxima de **38.6 °C** a las 17:00 h, con valores superiores a 36 °C sostenidos desde las 13:00 h hasta las 18:00 h. Este comportamiento es indicativo de la baja capacidad aislante del concreto expuesto frente a la radiación solar directa. En contraste, la losa con TV mostró un comportamiento térmico notablemente más estable, con una temperatura máxima de **29.6 °C** a las 23:00 h, a las 18:00 h cuando la losa STV alcanzó la máxima temperatura el TV marco **29.0 °C**, es decir, **9.6 °C** por debajo, véase Figura 66.

Figura 66

Temperatura superficial interior de losas 16 de abril

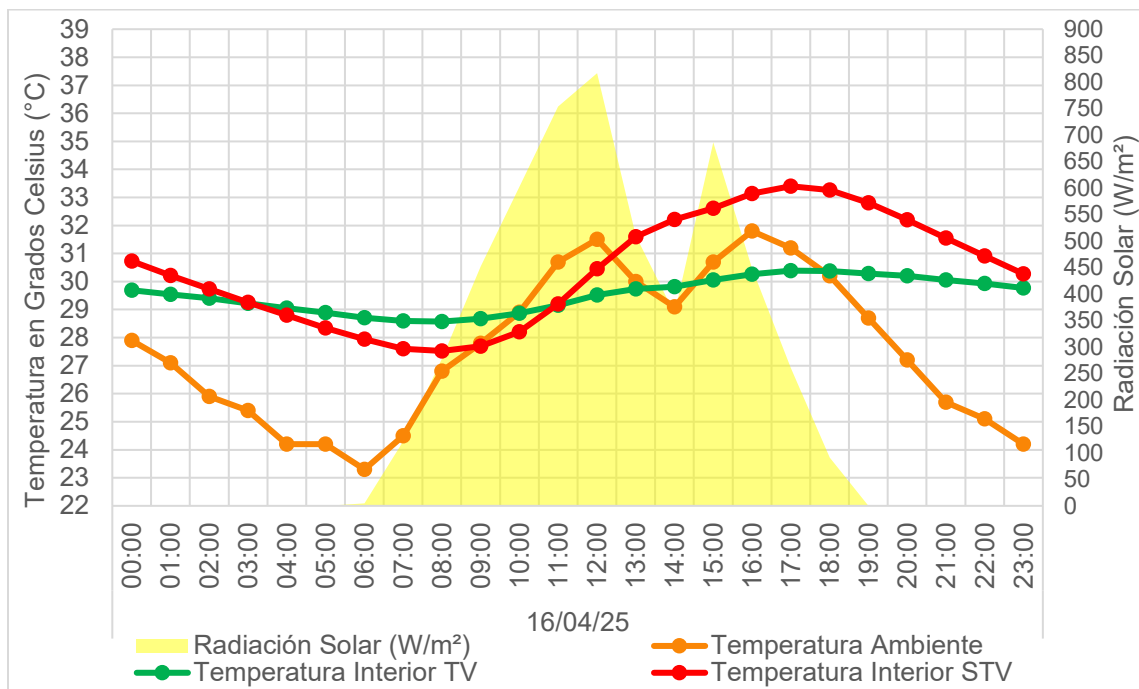


Nota. Gráfica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

En este contexto, el aula con losa convencional STV presentó un incremento sostenido de la temperatura interior a partir de las 11:00 h, alcanzando un máximo de **33.4 °C** a las 17:00 h, superando en todo momento el rango superior del confort térmico. Este sobrecalentamiento se mantuvo hasta altas horas de la noche, con registros de 30.3 °C incluso a las 23:00 h, lo cual indica una inercia térmica elevada y una disipación ineficiente del calor acumulado. En cambio, el aula con TV mostró un comportamiento térmico más estable y moderado. Su temperatura interior máxima fue de 30.4 °C entre las 17:00 y 18:00 h, es decir, hasta **3.0 °C** por debajo de la registrada en el aula STV en el mismo periodo, véase Figura 67.

Figura 67

Temperatura interior de espacios 16 de abril

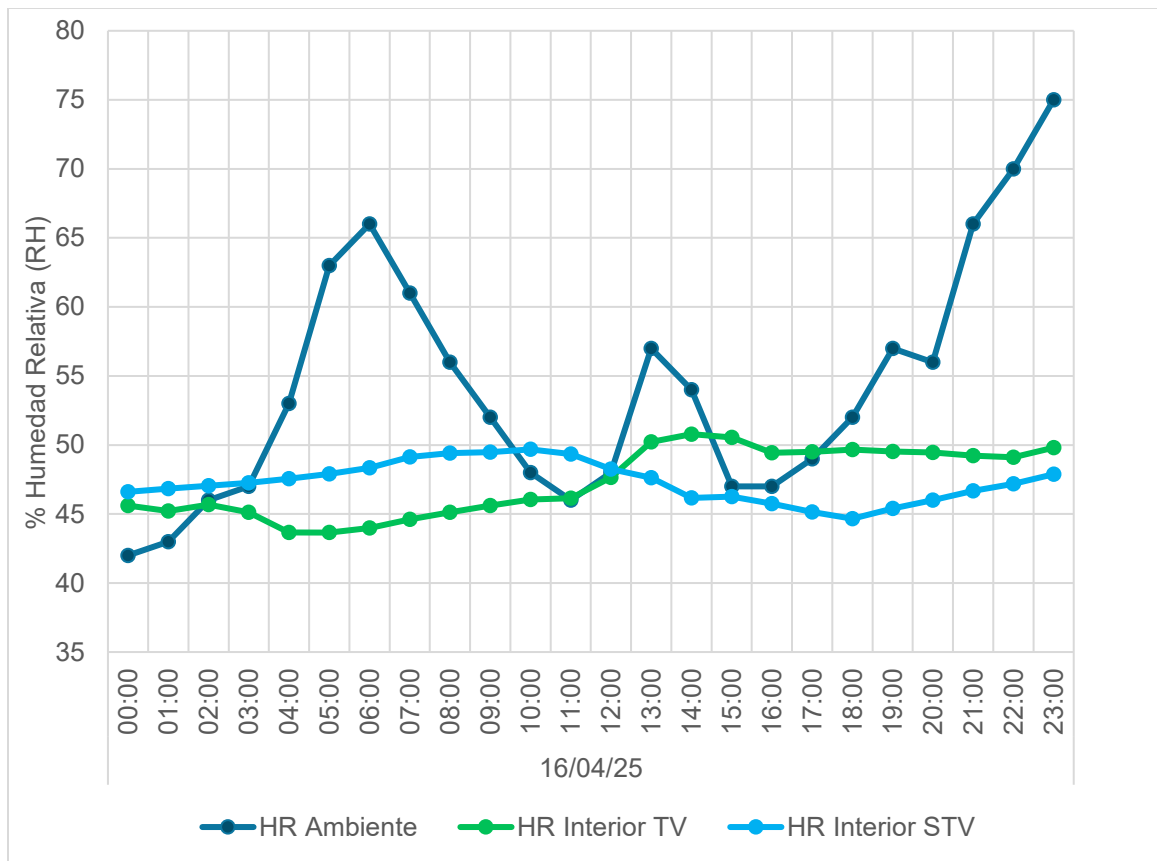


Además, durante gran parte del día, las temperaturas interiores en el espacio con techo verde se mantuvieron más próximas al umbral superior de confort, con valores entre 28.4 °C y 30.4 °C en las horas críticas de radiación solar.

Durante el 16 de abril, la humedad relativa ambiente presentó una oscilación notable entre el 42 % y el 75 %, con los valores más bajos registrados en las horas de mayor radiación solar. En el interior de las aulas, el comportamiento de la RH también evidenció diferencias importantes entre los sistemas de cubierta. En el espacio con techo verde TV, la humedad relativa interior osciló entre el 44 % y el 51 %, manteniéndose dentro de un rango relativamente constante a lo largo del día. En contraste, el aula con losa convencional STV presentó valores ligeramente más elevados, especialmente en la noche, alcanzando hasta 49 % a las 07:00 h y llegando a 48 %–50 %, véase Figura 68.

Figura 68

Humedad relativa interior 16 de abril



Nota. Grafica generada en Excel con datos de la estación climatológica de la UAS y la recolección de datos del equipo HOBO instalado al interior de los espacios.

Conclusiones de los Días Analizados

El análisis comparativo de los días representativos seleccionados (5, 6, 15 y 16 de abril) evidenció de manera consistente el efecto positivo del techo verde sobre las condiciones térmicas superficiales e interiores de las edificaciones monitoreadas. En días con menor temperatura ambiental, como el 5 de abril, el techo verde mostró capacidad de aislamiento eficaz, al reducir la temperatura superficial de la losa hasta en **9.9 °C** respecto al sistema convencional. Incluso bajo condiciones térmicas moderadas, el techo verde proporcionó estabilidad térmica.

Durante el 6 de abril, día con la menor temperatura interior en el aula con techo verde, se observó una reducción de hasta **3.9 °C** respecto al aula convencional, a pesar de una radiación solar que alcanzó los 830 W/m². Esto demuestra su efectividad bajo condiciones de carga térmica media-alta, favoreciendo un entorno térmicamente confortable.

En contraste, los días 15 y 16 de abril presentaron las condiciones ambientales más extremas del periodo monitoreado. La losa convencional alcanzó temperaturas superficiales de hasta **40.0 °C**, mientras que la interior superó los 33.9 °C, muy por encima del umbral superior de confort. En ambos casos, el techo verde permitió reducir la temperatura de la cubierta en más de **10.9 °C** y la interior en aproximadamente **3.7 °C**, amortiguando el impacto de la radiación solar intensa (hasta 817 W/m²).

Además, la humedad relativa en los espacios con techo verde se mantuvo más estable en todos los casos, lo cual es un factor clave para mantener la percepción de confort térmico, particularmente en climas cálido-secos donde la evaporación puede ser elevada. En suma, los datos muestran que el techo verde es una solución pasiva eficaz para mitigar el sobrecalentamiento interior en edificaciones expuestas a climas áridos cálidos, como el de Culiacán.

Conclusiones comparativas de los días seleccionados

El análisis comparativo de los cuatro días seleccionados evidencia de manera clara la eficacia del techo verde como estrategia pasiva de control térmico en entornos cálido-secos. A través de los distintos escenarios climáticos, se observa que: El techo verde logró reducir la **temperatura superficial** de la losa en todos los días, con diferencias que llegaron hasta los **10.9 °C** en condiciones de alta radiación solar (15 de abril), lo que resalta su capacidad de mitigar la carga térmica exterior. **Las temperaturas interiores** en el aula con techo verde fueron sistemáticamente más bajas que en el aula convencional, con diferencias de hasta **3.7 °C** en días críticos, lo que permitió mantener condiciones más cercanas al rango de confort.

La humedad relativa interior en el aula con techo verde fue más estable a lo largo del día, con variaciones más suaves incluso en las horas de mayor insolación, lo cual sugiere un mejor control micro climático.

Estos hallazgos refuerzan el argumento de que la implementación de techos verdes puede ser una solución viable y efectiva para reducir la temperatura interior de las edificaciones, por consecuencia para mejorar el confort térmico y reducir la carga energética en edificaciones ubicadas en zonas urbanas de clima cálido seco, como Culiacán. Además, su capacidad de actuar como regulador térmico en distintos contextos

desde días templados hasta jornadas extremadamente calurosas posiciona al techo verde como un componente clave en las estrategias de adaptación al cambio climático urbano.

Conclusiones Generales

La presente investigación permitió comprobar que la implementación de un **techo verde** en una edificación ubicada en región con **clima cálido semiseco**, como el de Culiacán, Rosales, Sinaloa, constituye una estrategia pasiva eficaz para la reducción de la temperatura interior y la mejora de las condiciones de confort térmico. El estudio experimental a escala real demostró que este sistema constructivo contribuye a mitigar la transferencia de calor a través de la losa de concreto armado, disminuyendo la temperatura superficial e interior de manera significativa respecto a un techo convencional expuesto a las mismas condiciones ambientales.

En términos generales, los registros de temperatura superficial de las losas mostraron **diferencias promedio hasta de 10.9 °C y 3.9 °C** de temperatura al interior de los espacios en las horas de máxima radiación solar, lo que representa una reducción considerable en la carga térmica interior. Asimismo, la humedad relativa en el espacio con techo verde se mantuvo dentro de rangos más estables y confortables, mientras que el espacio con losa convencional presentó mayores fluctuaciones térmicas y condiciones más secas.

Los resultados obtenidos también tienen implicaciones directas para el ámbito normativo local. Actualmente, las regulaciones en materia de construcción y eficiencia energética en Culiacán y en el estado de Sinaloa incorporan lineamientos generales, pero aún carecen de disposiciones específicas que promuevan estrategias pasivas basadas en infraestructura verde. En este sentido, la evidencia generada por esta investigación particularmente la reducción de temperatura interior hacia rangos de confort térmico

reportados en la literatura para climas cálidos semisecos ofrece un sustento técnico sólido para considerar la inclusión de techos verdes en los reglamentos municipales de construcción, así como en programas estatales orientados a la vivienda sustentable y la mitigación del calor urbano. De este modo, el estudio no solo contribuye al conocimiento científico, sino que también puede servir como insumo para la actualización normativa, fortaleciendo la pertinencia aplicada y el potencial de incidencia en las políticas públicas locales.

Cumplimiento de los Objetivos Específicos

1. *Diseño y Construcción del Techo Verde Experimental*

Se logró desarrollar un sistema de techo verde adaptado a una losa de concreto armado existente, con materiales de bajo costo, especies vegetales locales y capas funcionales ajustadas a las condiciones estructurales del edificio. El diseño se basó en criterios técnicos de la norma NADF-013-RNAT-2017, garantizando impermeabilidad, drenaje, retención hídrica y aislamiento térmico. Este proceso permitió establecer un modelo replicable para edificaciones en clima cálido seco, con carga estructural moderada y mínimo mantenimiento.

2. *Comparación de Variables Térmicas y Ambientales*

El monitoreo simultáneo de temperatura superficial interior, temperatura ambiente, temperatura del aire interior y humedad relativa evidenció diferencias notorias entre ambos sistemas de cubierta.

- a) En los días de mayor radiación (15 y 16 de abril de 2025), el espacio con techo verde presentó reducciones de temperatura interior hasta **3.7 °C** respecto al espacio con losa convencional.

- b) Durante los días de menor temperatura ambiental (5 y 6 de abril), la losa con vegetación mostró un comportamiento térmico más estable y un retardo significativo en la transferencia de calor, reduciendo hasta $3.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ los picos térmicos diurnos y manteniendo condiciones interiores que se acercan al rango de confort.

Estos resultados confirman que el techo verde actúa como una barrera térmica natural, capaz de amortiguar las variaciones ambientales y favorecer el confort interior sin recurrir a sistemas mecánicos de climatización.

3. *Contraste con Investigaciones Previas en Climas Cálidos*

Los resultados obtenidos guardan coherencia con los estudios realizados en contextos semejantes. En Torreón, Quiroa-Herrera et al. (2021) reportaron reducciones de hasta $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en superficie interior de las losas y hasta $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ en interiores; López Silva (2020) en Ensenada documentó disminuciones de $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ en superficie y $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en interiores; mientras que Salas (2024) en Mexicali observó ahorros energéticos significativos.

En el caso de Culiacán, las diferencias registradas se ubican dentro de rangos comparables, reafirmando la efectividad térmica del techo verde en condiciones de alta radiación solar. La coincidencia con investigaciones nacionales e internacionales confirma la validez del experimento y su aportación al conocimiento aplicado en regiones de clima cálido seco.

Comprobación de la Hipótesis

Los resultados permiten confirmar la hipótesis de investigación: la implementación de un techo verde en edificaciones ubicadas en región con clima cálido reduce de manera significativa la temperatura interior en comparación con techos convencionales de losa de concreto armado.

El desempeño térmico registrado, junto con la estabilidad de la humedad relativa y la reducción de la radiación transmitida al interior, demuestra que el techo verde actúa como un sistema de aislamiento natural que contribuye al confort térmico, la eficiencia energética y la mitigación del efecto de isla de calor urbano.

Implicaciones Ambientales y Arquitectónicas

El estudio aporta evidencia empírica relevante para el diseño sustentable en regiones cálidas. En primer lugar, valida la pertinencia de integrar soluciones basadas en la naturaleza en la arquitectura, promoviendo la reducción del consumo energético asociado a la climatización. En segundo lugar, demuestra la viabilidad técnica y constructiva de incorporar techos verdes en edificaciones existentes sin requerir intervenciones estructurales mayores. Finalmente, el experimento contribuye a los ODS 11 y 13, al fortalecer la resiliencia urbana y fomentar prácticas arquitectónicas compatibles con la acción climática y el bienestar ambiental.

Proyecciones y Recomendaciones

El desarrollo de la presente investigación abre un amplio panorama de líneas de estudio relacionadas con la aplicación y optimización de los techos verdes en climas cálidos. Los resultados obtenidos demuestran su potencial como estrategia para la reducción de temperatura interior, pero también revelan la necesidad de profundizar en aspectos complementarios que fortalezcan su desempeño técnico, ambiental y económico. En este sentido, se recomienda continuar con investigaciones que aborden los siguientes ejes temáticos:

Evaluación Estacional

Es recomendable realizar estudios de evaluación estacional del desempeño térmico, considerando las variaciones de precipitación, humedad del sustrato y radiación

solar a lo largo del año. Analizar el comportamiento del techo verde en invierno, verano y los periodos de transición permitirá identificar su eficiencia energética en distintos escenarios climáticos. Esta línea de investigación contribuiría a determinar la capacidad del sistema para adaptarse a fluctuaciones ambientales y a establecer pautas de diseño más precisas para regiones con marcada variabilidad térmica.

Análisis Energético Integral

Se sugiere desarrollar investigaciones que integren el análisis energético completo del edificio, relacionando la reducción térmica obtenida con el ahorro potencial en consumo eléctrico destinado a climatización durante los meses de mayor calor. Este enfoque permitiría cuantificar los beneficios económicos y ambientales derivados de la implementación de techos verdes, además de reforzar su viabilidad como medida de eficiencia energética. Asimismo, la incorporación de herramientas de simulación térmica y modelado energético podría mejorar la predicción del desempeño de estos sistemas a distintas escalas constructivas.

Estudios de Replicabilidad

La replicabilidad del sistema representa un componente esencial para su incorporación en políticas públicas y programas de infraestructura verde. Se propone aplicar el modelo experimental en tipologías constructivas diversas, tales como vivienda social, hospitales, dependencias gubernamentales, escuelas, plazas comerciales y paraderos de transporte urbano. Estos escenarios permitirían validar el comportamiento térmico y la factibilidad económica del techo verde en contextos con diferentes demandas energéticas y usos del espacio. De esta manera, los resultados podrían servir como base para estrategias de urbanismo sustentable a nivel regional y nacional..

Riegos con Agua Reciclada

Otra línea de investigación prioritaria es el análisis del riego mediante agua tratada o reciclada, con el fin de determinar la viabilidad hídrica del sistema en contextos urbanos con recursos limitados. Evaluar la respuesta de distintas especies vegetales al uso de aguas grises o pluviales contribuiría a optimizar el mantenimiento de los techos verdes sin comprometer el suministro de agua potable. Esta práctica también reforzaría los principios de economía circular y gestión sostenible de recursos, alineándose con los objetivos de desarrollo urbano resiliente.

De manera general, los hallazgos de esta investigación fortalecen el conocimiento científico y técnico sobre techos verdes en México, generando una base sólida para su aplicación en la arquitectura sustentable y en la formulación de políticas públicas orientadas a la adaptación climática de las ciudades.

Conclusión General

La presente investigación permitió demostrar, mediante un enfoque experimental y comparativo, la eficacia de los techos verdes como estrategia pasiva de mitigación térmica en edificaciones ubicadas en clima cálido semiseco. Los resultados obtenidos evidencian una reducción significativa de la temperatura interior y superficial, acompañada de una mejora en las condiciones de confort térmico y potencial ahorro energético. Estos hallazgos confirman que la incorporación de vegetación en los techos de concreto armado no solo representa una solución técnica viable, sino también una alternativa sustentable con impacto directo en la adaptación climática urbana.

Asimismo, la investigación contribuye a fortalecer el marco teórico y normativo sobre infraestructura verde en México, al generar evidencia empírica aplicable a futuras actualizaciones de políticas y reglamentos locales. El modelo metodológico empleado

ofrece una base reproducible para nuevos estudios que consideren variables estacionales, energéticas e hídricas, ampliando el conocimiento sobre el comportamiento térmico de los techos verdes en diferentes contextos. En síntesis, los resultados reafirman la importancia de integrar criterios de eficiencia energética, resiliencia ambiental y diseño bioclimático en la planeación urbana, consolidando a los techos verdes como un componente esencial del desarrollo sostenible en las ciudades del siglo XXI.

Bibliografía

- ACROS Fukuoka. (s. f.). *Step Garden – Facility Guide*. Recuperado de <https://www.acros.or.jp/english/floor/stepgarden.html>
- Akbari, H., Konopacki, S., & Pomerantz, M. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295–310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Allocca, C., Chen, Q., & Glicksman, L. R. (2003). Design analysis of single-sided natural ventilation. *Energy and Buildings*, 35(8), 785–795.
- Álvarez, J. (2017). Sistemas constructivos y eficiencia energética en vivienda de interés social en climas cálidos. *Revista de Arquitectura y Urbanismo*, 38(2), 45–59.
- Álvarez Narváez, F., Gómez, L., & Rodríguez, M. (2023). Beneficio productivo, económico-social y ambiental de la implementación de los techos verdes. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 18(1), 55–72.
- Andrić, I., Kamal, A., & Al-Ghamdi, S. G. (2020). Efficiency of green roofs and green walls as climate change mitigation measures in extremely hot and dry climate: Case study of Qatar. *Energy Reports*, 6, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.09.006>
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., De' Rossi, F., & Vanoli, G. P. (2013). Energy refurbishment of existing buildings through the use of phase change materials: Energy savings and indoor comfort in the cooling season. *Applied Energy*, 113, 990–1007.
- Ascione, F., Bianco, N., De Masi, R. F., Mauro, G. M., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates: A quantitative energy performance analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 272–284.

- Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., Turni, G., & Vanoli, G. P. (2013). Green roofs in European climates: A parametric analysis of thermal and energy performance. *Energy and Buildings, 67*, 662–676.
- ASHRAE. (2017). *ANSI/ASHRAE Standard 55-2017: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Banting, D., Doshi, H., Li, J., Missios, P., Au, A., Currie, B. A., & Verrati, M. (2005). *Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the City of Toronto*. Ryerson University.
- Berardi, U. (2016). The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings, 121*, 217–229.
- Berndtsson, J. C. (2010). Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering, 36*(4), 351–360.
- California Academy of Sciences. (s. f.). *The Living Roof*.
<https://www.calacademy.org/exhibits/living-roof>
- Castañeda Nolasco, G. (2014). *Sistema Domotej–Techo Verde*. Repositorio Institucional UNICACH.
- Castleton, H. F., Stovin, V., & Beck, S. B. M. (2010). Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings, 42*(10), 1582–1591.
- City of Chicago. (s. f.). *City Hall's Rooftop Garden*. Chicago Department of Fleet and Facility Management.

- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C., & Maginnis, S. (Eds.). (2016). *Nature-based solutions to address global societal challenges*. IUCN.
<https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2016.13.en>
- Comisión Federal de Electricidad. (2023). *Informe anual de sostenibilidad 2023*. CFE.
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Normales climatológicas por estado*. Gobierno de México.
- Comisión Nacional del Agua. (2023). *Reporte del clima en México*. Gobierno de México.
- Contreras-Bejarano, E., et al. (2023). Análisis estructural de cargas en techos verdes. *Revista Latinoamericana de Construcción*.
- Cortés Sosa, A. (2019). *Evaluación térmica de techos verdes en clima cálido húmedo* [Tesis de maestría no publicada]. Universidad Veracruzana.
- Cuevas Acuña, M. L., Martínez-Salinas, G., & Pérez-Vega, A. (2024). Evaluación experimental de un prototipo de techo verde en clima cálido seco. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 12(26).
- De Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549–561.
- Elnabawi, M. H., & Saber, E. (2022). A numerical study of green and cool roof strategies. *Journal of Building Performance Simulation*.
- Fezzioui, N., & Benaichata, B. (2021). Green roofs under hot and dry climate in south-west of Algeria. *Journal of Building Engineering*.
- FLL. (2018). *Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing*. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V.

- Gaceta Oficial del Distrito Federal. (2017). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2017*. Gobierno de la Ciudad de México.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM.
- Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276–1285.
- Givoni, B. (1994). *Passive and Low Energy Cooling of Buildings*. Van Nostrand Reinhold.
- Givoni, B. (1998). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons.
- Gobierno del Distrito Federal. (2007). *Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007*.
- Grimmond, S. (2007). Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming. *The Geographical Journal*, 173(1), 83–88.
- Imhof, L., Suárez, E., Cáceres, N., Robbiati, F., Broilo, A., Pellizari, L., Suárez, M., Hick, E. C., Matoff, E., & Galetto, L. (2021). Thermal performance of an extensive green roof under semi-arid conditions in central Argentina. *Journal of Green Building*, 16(1), 17–42.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Wiley.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Atlas de vulnerabilidad al cambio climático en México*. Gobierno de México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. INEGI.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Estadísticas demográficas de Culiacán*. INEGI.

International Energy Agency. (2019). *Global Status Report for Buildings and Construction*. IEA.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Jiménez López, J. (2013). *Evaluación experimental de techos verdes en clima cálido húmedo* [Tesis de maestría no publicada].

Kabisch, N., Korn, H., Stadler, J., & Bonn, A. (2017). Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas. *Ecology and Society*, 22(4).

Khalid, & Ibraheem. (2023). Experimental study on green roofs in Baghdad. *International Conference on Engineering Sciences*.

Köppen, W. (1936). Das geographische System der Klimate. En W. Köppen & R. Geiger (Eds.), *Handbuch der Klimatologie*.

Lechner, N. (2014). *Heating, Cooling, Lighting: Sustainable Design Methods for Architects*. Wiley.

Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., & Prather, M. (2007). Historical Overview of Climate Change. En *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press.

- Liu, K., & Baskaran, B. (2003). *Thermal performance of green roofs through field evaluation*. National Research Council Canada.
- López Silva, D. V. (2020). *Evaluación térmica de techos verdes con especies CAM* [Tesis de maestría no publicada]. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE).
- Mabdeh, A., et al. (2021). Green roofs in semi-arid climates.
- Medina, S. B. (2020). *Jardines colgantes y techos verdes: Historia y evolución*.
- 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.
- Mihalakakou, G., Souliotis, M., & Papadaki, M. (2023). Green roofs as a nature-based solution for improving urban sustainability. *Renewable Energy*.
- Minke, G. (2004). *Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo.
- Minke, G. (2012). *Building with Earth*. Birkhäuser.
- Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023*. ONU.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Köhler, M., Liu, K. K. Y., & Rowe, B. (2007). Green roofs as urban ecosystems: Ecological structures, functions, and services. *BioScience*, 57(10), 823–833.
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.
- Olgay, V. (2015). *Arquitectura y clima: Manual de diseño bioclimático*. Gustavo Gili.

- Onset. (s. f.). *HOBO MX1104 Analog/Temp/RH/Light Data Logger*. Recuperado de <https://www.onsetcomp.com/>
- Ordóñez-López, M. E., & Pérez-Sánchez, R. (2015). Evaluación térmica comparativa de un techo verde y un techo blanco. *Acta Universitaria*, 25(2), 64–72.
- Parra Montoya, D., Rivera, M. E., & Sánchez Montaña, L. R. (2020). Techos verdes y gestión hídrica. *Revista de Tecnología*.
- Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., & Bass, B. (1999). *Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada*. CMHC.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394–398.
- Quiroa-Herrera, J., Castañeda Nolasco, G., & Villanueva Solís, J. (2021). Desempeño térmico de cubiertas verdes en vivienda social en Torreón. *Revista de Arquitectura*.
- Sahagún Valenzuela, M. I. (2019). *Evaluación térmica de techos verdes en el noroeste de México* [Tesis doctoral no publicada]. Universidad Autónoma Metropolitana.
- Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466–1478.
- Salas, T., Ramírez, H., & Gómez, F. (2024). Techos con vegetación o techos verdes: una estrategia para alcanzar la comodidad térmica. *Ciencia Vital*.
- Santamouris, M. (2014). *Cooling the cities: Urban heat islands and mitigation technologies*. Routledge.
- Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México [SEDEMA]. (2017). *Norma Ambiental NADF-013-RNAT-2017*. Gobierno de la Ciudad de México.



- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (s. f.). *Atlas Digital Geográfico*. Gobierno de México.
- Stovin, V., Vesuviano, G., & Kasmin, H. (2013). The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, *414*, 148–161.
- Ulrich, R. S., Simons, R. F., Losito, B. D., Fiorito, E., Miles, M. A., & Zelson, M. (1991). Stress recovery during exposure to natural and urban environments. *Journal of Environmental Psychology*, *11*(3), 201–230.
- United Nations Environment Programme [UNEP]. (2023). *Global Environment Outlook*. UNEP.
- Vancouver Convention Centre. (s. f.). *Sustainability*.
<https://www.vancouverconventioncentre.com>
- Villarreal, E. L., & Bengtsson, L. (2005). Response of a sedum green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*, *25*(1), 1–7.
- Weatherspark. (2024). *Clima promedio en Culiacán, México*.
<https://es.weatherspark.com/>
- Yang, J., Yu, Q., & Gong, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric Environment*, *42*(31), 7266–7273.
- Zaina, S., Elgizawy, S., & Nassar, U. (2021). Green roof design strategies for desert climates: A review for Qatar. *Sustainability*, *13*(14).









Anexo 1. Paleta vegetal implementada en el proyecto

ESPECIE	OREJA DE BURRO Sansevieria trifasciata	
TIPO Arbusto perenne	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde grisáceo Tipo de raíces: fibroso Dimension del espacio (cm): 30-50 cm Altura promedio (cm): 30-60 cm Altura maxima (cm): 1 m
ORIGEN Oeste de África hasta Nigeria y este de Rep. del Congo	 Una vez cada 2-3 semanas  Bien drenante	
ESPECIE	OREJA DE BURRO ENANA Sansevieria enana	
TIPO Suculenta	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol brillante e indirecto	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde claro Tipo de raíces: rizomatoso Dimension del espacio: 20-30 cm Altura promedio: 15-20 cm Altura maxima: 30 cm
ORIGEN África tropical y Asia	 Regar cada 15 dias  Sustrato fertil y bien drenado	





ESPECIE	OREJA DE BURRO Sansevieria trifasciata	
TIPO Arbusto perenne	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde grisáceo Tipo de raíces: fibroso Dimension del espacio (cm): 30-50 cm Altura promedio (cm): 30-60 cm Altura maxima (cm): 1 m
ORIGEN Oeste de África hasta Nigeria y este de Rep. del Congo	 Una vez cada 2-3 semanas  Bien drenante	
ESPECIE	OREJA DE BURRO ENANA Sansevieria enana	
TIPO Suculenta	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol brillante e indirecto	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde claro Tipo de raíces: rizomatoso Dimension del espacio: 20-30 cm Altura promedio: 15-20 cm Altura maxima: 30 cm
ORIGEN África tropical y Asia	 Regar cada 15 dias  Sustrato fertil y bien drenado	









ESPECIE	DRACENA MARGINATA Dracaena marginata	
TIPO Arbusto	REQUERIMIENTOS  Luz indirecta de media a baja Verano: 2 o 3 veces por semana	
ORIGEN Áreas tropicales de África.	 Invierno: 1 vez a la semana  Bien drenado, suelto y rico en materia orgánica	
CARACTERISTICAS Color del follaje: verde oscuro Tipo de raíces: fibrosa Dimension del espacio (cm):1 - 1.5 m Altura promedio (cm):1.5 m		









ESPECIE	ARALIA PEREJIL Polyscias fruticosa Elegans	
TIPO Arbusto perenne	REQUERIMIENTOS  Luz indirecta brillante	
ORIGEN Este de Australia	 Cada 7-10 días  Sustrato bien drenado	
CARACTERISTICAS Color del follaje: verde claro/amarillento Color de la flor: blanco verdoso Tipo de raíces: fibroso Dimension del espacio: 60 cm Dimension de la flor: 1 - 2 cm Altura promedio: 1 - 1.5 m		

<p>ESPECIE</p>	<p>PALMA ROBELINA Phoenix roebelenii</p> 	
<p>TIPO Palmera enana</p>	<p>REQUERIMIENTOS</p> <p> Resistente al sol</p>	<p>CARACTERISTICAS</p>
<p>ORIGEN Sudeste de Asia, el sudoeste de China, norte de Laos y de Vietnam</p>	<p> Verano: 2 veces por semana Invierno: 1 cada 10 a 15 días</p> <p> Buen drenaje y sea mínimamente fértil.</p>	<p>Color del follaje: verde brillante Tipo de raíces: fibrosa Dimension del espacio (cm): 1 m³ Altura promedio: 1.5 m</p>
<p>ESPECIE</p>	<p>LIRIO ROJO ARAÑA Adenium obesum</p> 	
<p>TIPO Arbusto perenne</p>	<p>REQUERIMIENTOS</p> <p> Resistente al sol</p>	<p>CARACTERISTICAS</p>
<p>ORIGEN África y Arabia</p>	<p> 1 vez por semana</p> <p> sustrato bien drenado</p>	<p>Color del follaje: Combina Color de la flor: Tipo de raíces: Dimension del espacio (cm): Dimension de la flor (cm): Altura promedio (cm): 1 m</p>

ESPECIE	BUGAMBILIA MINI Bougainvillea spectabilis	
TIPO Trepadora arbustiva	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol Primavera/Verano: una vez por semana.  En maceta: 3 o 4 días.  Bien drenantes	
ORIGEN Brasil	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde brillante Color de la flor: blanco, fucsia, rojo, morado Tipo de raíces: fibrosa Dimension de la flor (cm): 1-2 cm Altura promedio (cm): 1-2 m	

ESPECIE	CORONA DE CRISTO Euphorbia mili	
TIPO Arbusto ornamental	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	
ORIGEN Madagascar	 Cada 10 a 12 días  Sustrato bien drenado CARACTERISTICAS Color del follaje: verde Color de la flor: rosa/roja/blanca Tipo de raíces: fibrosa y superficial Dimension del espacio: 40-60 cm Dimension de la flor: 1.5-3 cm Altura promedio: 60 cm - 1.5m	

ESPECIE	CANDELILLA Euphorbia antisiphilitica	
TIPO Arbusto perenne	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	CARACTERISTICAS Color del follaje: Verde grisáceo Color de la flor: Verde amarillo Tipo de raíces: Fibrosa Dimension de la flor (cm): 1-2 cm Altura promedio (cm): 50 cm-1 m Altura maxima (cm): 1.5 m
ORIGEN México y sur de Estados Unidos	 Una vez por semana  Áridos y bien drenantes	
ESPECIE	FLOR DEL DESIERTO Adenium obesum	
TIPO Arbusto	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde brillante Color de la flor: rosa/blanca/roja Tipo de raíces: raíz tuberosa Dimension del espacio: 1-2 m Dimension de la flor: 7 cm Altura promedio: 1-3 m
ORIGEN África y Arabia	 Primavera/Verano: de 7 a 10 días. Otoño/Invierno: 1 vez al mes.  Sustrato bien drenado	

ESPECIE	CORONA MINI Euphorbia milii	
TIPO Arbusto perenne	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde brillante Color de la flor: rojo, rosa, amarillo o blanco Tipo de raíces: fibrosa Dimension de la flor (cm): 1-2 cm Altura promedio (cm): 30-50 cm Altura máxima (cm): 60 cm
ORIGEN Madagascar.	 Una vez cada tres semanas  Sustrato bien drenado	
ESPECIE	PALMA DE MADAGASCAR Pachypodium	
TIPO Arbusto suculento o árbol pequeño	REQUERIMIENTOS  Resistente al sol	CARACTERISTICAS Color del follaje: verde Color de la flor: blanca Tipo de raíces: superficiales Dimension del espacio: 1-2 m Dimension de la flor: 5 - 7 cm Altura promedio: 1.5
ORIGEN Regiones áridas de África del Sur	 Cada 12 a 15 días  Suelo suelto, drenado y moderadamente fértil	

Anexo 2. Información Concentrada de los Días Seleccionados para el Análisis

Fecha	Hora	Temperatura Ambiente	Radiación Solar (W/m ²)	Temperatura Losa TV	Temperatura Losa STV	Temperatura Interior TV	Temperatura Interior STV	HR Ambiente	HR Interior TV	HR Interior STV
05/04/25	00:00	18.2	0	25.7	24.6	25.2	24.9	70	48	48
05/04/25	01:00	17.2	0	25.6	23.4	24.9	24.3	70	47	48
05/04/25	02:00	16.6	0	25.4	22.3	24.7	23.8	68	47	49
05/04/25	03:00	15.9	0	25.2	21.3	24.4	23.3	68	46	49
05/04/25	04:00	16.0	0	25.1	20.4	24.1	22.8	68	45	49
05/04/25	05:00	15.8	0	24.9	19.6	23.9	22.4	67	45	50
05/04/25	06:00	15.4	1	24.7	18.8	23.6	22.0	66	44	50
05/04/25	07:00	15.9	85	24.4	18.1	23.4	21.6	63	44	50
05/04/25	08:00	18.1	272	24.2	17.9	23.3	21.3	54	43	50
05/04/25	09:00	19.6	460	24.0	18.0	23.3	21.2	48	43	51
05/04/25	10:00	21.2	631	23.8	18.8	23.5	21.4	46	42	51
05/04/25	11:00	22.6	750	23.7	21.6	23.7	22.3	36	44	50
05/04/25	12:00	23.6	814	23.6	24.9	24.0	23.8	35	42	51
05/04/25	13:00	24.7	804	23.5	28.2	24.3	25.4	33	42	48
05/04/25	14:00	25.4	735	23.5	30.9	24.6	26.6	29	40	46
05/04/25	15:00	26.0	603	23.6	33.0	24.9	27.6	26	39	45
05/04/25	16:00	25.9	435	23.8	34.1	25.1	28.3	27	38	43
05/04/25	17:00	24.7	245	23.9	34.2	25.1	28.5	36	39	40
05/04/25	18:00	22.4	58	24.1	33.2	25.1	28.2	45	39	41
05/04/25	19:00	20.6	0	24.2	31.4	24.9	27.6	51	40	42
05/04/25	20:00	20.1	0	24.3	29.5	24.8	26.8	49	40	42
05/04/25	21:00	19.6	0	24.3	27.8	24.7	26.1	51	40	42
05/04/25	22:00	19.1	0	24.3	26.2	24.5	25.3	52	40	43
05/04/25	23:00	18.3	0	24.3	24.8	24.3	24.6	51	40	43
06/04/25	00:00	17.6	0	24.2	23.5	24.1	23.9	49	39	44
06/04/25	01:00	16.9	0	24.1	22.3	23.9	23.4	49	38	44
06/04/25	02:00	16.1	0	24.0	21.1	23.6	22.8	56	38	44
06/04/25	03:00	15.2	0	23.8	20.1	23.4	22.3	60	38	44
06/04/25	04:00	14.2	0	23.7	19.1	23.1	21.8	62	38	45
06/04/25	05:00	14.3	0	23.5	18.3	22.9	21.4	63	38	45
06/04/25	06:00	13.9	2	23.3	17.5	22.6	21.0	65	38	45
06/04/25	07:00	15.6	87	23.1	16.9	22.4	20.5	62	39	46
06/04/25	08:00	19.2	277	22.9	16.9	22.4	20.4	52	39	46
06/04/25	09:00	22.9	467	22.7	17.2	22.5	20.4	42	39	47
06/04/25	10:00	23.9	631	22.6	18.2	22.7	20.9	40	40	47
06/04/25	11:00	25.7	748	22.5	21.3	23.1	21.9	32	40	47
06/04/25	12:00	26.6	802	22.4	24.9	23.5	23.5	32	40	47
06/04/25	13:00	27.6	796	22.4	28.4	24.0	25.2	32	41	43
06/04/25	14:00	28.3	731	22.5	31.4	24.4	26.6	29	40	44
06/04/25	15:00	28.3	603	22.7	33.6	24.7	27.7	28	39	43
06/04/25	16:00	28.9	439	23.0	34.9	24.9	28.5	26	38	40
06/04/25	17:00	28.1	245	23.2	35.2	25.1	28.8	29	38	40
06/04/25	18:00	26.6	59	23.5	34.5	25.1	28.7	35	38	39
06/04/25	19:00	24.9	0	23.7	32.9	25.0	28.2	41	39	40
06/04/25	20:00	23.7	0	23.9	31.2	24.9	27.5	42	39	41
06/04/25	21:00	23.7	0	24.1	29.6	24.9	26.9	41	39	41

06/04/25	22:00	23.1	0	24.2	28.1	24.8	26.3	41	39	41
06/04/25	23:00	21.7	0	24.2	26.8	24.6	25.7	44	39	42
15/04/25	00:00	24.3	0	28.3	29.5	28.5	29.1	71	49	48
15/04/25	01:00	23.8	0	28.3	28.5	28.4	28.6	74	49	48
15/04/25	02:00	23.3	0	28.2	27.6	28.2	28.1	72	50	49
15/04/25	03:00	22.6	0	28.1	26.7	28.0	27.6	79	50	50
15/04/25	04:00	21.9	0	28.1	25.8	27.8	27.2	83	52	51
15/04/25	05:00	21.1	0	28.0	25.0	27.6	26.8	82	52	52
15/04/25	06:00	20.7	8	27.8	24.3	27.5	26.5	80	52	53
15/04/25	07:00	21.4	97	27.7	23.7	27.3	26.1	82	52	53
15/04/25	08:00	23.2	279	27.6	23.7	27.2	25.9	78	53	54
15/04/25	09:00	25.7	475	27.5	24.2	27.3	26.0	67	53	54
15/04/25	10:00	26.7	662	27.4	25.6	27.5	26.5	60	53	54
15/04/25	11:00	29	772	27.3	28.2	27.8	27.5	54	54	54
15/04/25	12:00	32	816	27.3	31.3	28.3	29.0	43	54	52
15/04/25	13:00	35.3	700	27.4	34.4	28.9	30.6	33	52	49
15/04/25	14:00	35.8	784	27.5	37.0	29.4	32.0	35	50	47
15/04/25	15:00	36.3	633	27.8	39.0	29.9	33.1	32	48	46
15/04/25	16:00	34.8	409	28.0	40.0	30.1	33.7	35	48	45
15/04/25	17:00	34.4	121	28.3	40.0	30.2	33.9	33	47	44
15/04/25	18:00	33	38	28.5	39.1	30.2	33.6	37	46	44
15/04/25	19:00	31.3	0	28.7	37.8	30.1	33.2	42	46	44
15/04/25	20:00	30.2	0	28.8	36.4	30.1	32.7	44	46	45
15/04/25	21:00	29.8	0	29.0	35.1	30.0	32.2	43	46	45
15/04/25	22:00	29.8	0	29.1	33.9	29.9	31.7	41	46	46
15/04/25	23:00	29	0	29.1	32.7	29.8	31.2	40	46	46
16/04/25	00:00	27.9	0	29.1	31.6	29.7	30.7	42	46	47
16/04/25	01:00	27.1	0	29.1	30.6	29.5	30.2	43	45	47
16/04/25	02:00	25.9	0	29.1	29.6	29.4	29.7	46	46	47
16/04/25	03:00	25.4	0	29.1	28.6	29.2	29.3	47	45	47
16/04/25	04:00	24.2	0	29.0	27.7	29.1	28.8	53	44	48
16/04/25	05:00	24.2	0	28.9	26.9	28.9	28.3	63	44	48
16/04/25	06:00	23.3	5	28.8	26.1	28.7	27.9	66	44	48
16/04/25	07:00	24.5	122	28.7	25.5	28.6	27.6	61	45	49
16/04/25	08:00	26.8	278	28.6	25.7	28.6	27.5	56	45	49
16/04/25	09:00	27.8	452	28.5	26.3	28.7	27.7	52	46	49
16/04/25	10:00	28.9	602	28.4	27.7	28.9	28.2	48	46	50
16/04/25	11:00	30.7	754	28.4	30.0	29.1	29.2	46	46	49
16/04/25	12:00	31.5	817	28.4	32.8	29.5	30.5	48	48	48
16/04/25	13:00	30	510	28.4	35.4	29.7	31.6	57	50	48
16/04/25	14:00	29.1	363	28.5	36.4	29.8	32.2	54	51	46
16/04/25	15:00	30.7	686	28.7	37.2	30.1	32.6	47	51	46
16/04/25	16:00	31.8	449	28.8	38.3	30.3	33.1	47	49	46
16/04/25	17:00	31.2	261	29.0	38.6	30.4	33.4	49	49	45
16/04/25	18:00	30.2	91	29.2	38.0	30.4	33.3	52	50	45
16/04/25	19:00	28.7	0	29.3	36.8	30.3	32.8	57	50	45
16/04/25	20:00	27.2	0	29.5	35.3	30.2	32.2	56	49	46
16/04/25	21:00	25.7	0	29.5	33.7	30.1	31.6	66	49	47
16/04/25	22:00	25.1	0	29.6	32.3	29.9	30.9	70	49	47
16/04/25	23:00	24.2	0	29.6	31.0	29.8	30.3	75	50	48

Anexo 3. Foto del Techo Verde 26 de noviembre 2025

