



Este apartado forma parte del libro:

## ***Por unas ciudades más humanas XXV Congreso Nacional ANPUD 2025***

***Rodrigo Franco Muñoz  
(Coordinador)***



editorial.uaa.mx



libros.uaa.mx



revistas.uaa.mx



libreriavirtual.uaa.mx

**Número de edición:** Primera edición electrónica

**Editorial(es):**

- Universidad Autónoma de Aguascalientes

**País:** México

**Año:** 2026

**Páginas:** 276 pp.

**Formato:** PDF

**ISBN:** 978-968-9752-12-7

**DOI:**

<https://doi.org/10.33064/UAA/978-968-9752-12-7>

**Licencia CC:**



**Disponible en:**

<https://libros.uaa.mx/uaa/catalog/book/377>

# SEGUNDO EJE:

## SUSTENTABILIDAD Y MEDIO AMBIENTE

### DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN TECHO VERDE EN CLIMA CÁLIDO SECO: CULIACÁN ROSALES, SINALOA, MÉXICO

Gilberto Pérez López  
Juan Carlos Rojo Carrascal  
Gabriel Castañeda Nolasco

#### Resumen

El crecimiento de las ciudades y sus consecuencias incrementan el efecto isla de calor urbano que impacta en la temperatura del aire exterior e interior de las edificaciones. Por consiguiente, se incrementa la demanda de energía en los edificios tras la creciente utilización de equipos eléctricos para mejorar las condiciones térmicas producidas.

Por lo anterior se expone el resultado de la evaluación del comportamiento térmico experimental de un techo verde realizado en el mes de mayo. En el experimento se utilizaron dos losas de concreto reforzado, una con cubierta verde y la otra convencional que fungió como testigo. Las dos fueron construidas en el mismo edificio ubicado en la ciudad de Culiacán, que registra un clima semiárido cálido.

Los parámetros medidos fueron radiación solar, temperatura del aire y humedad exterior, temperatura superficial interior de las losas, la temperatura y humedad del aire interior. El resultado demuestra que la ganancia térmica de la losa disminuye significativamente a través de la cubierta vegetal, lo que motiva su aplicabilidad para reducir el consumo de energía utilizada en los quipos eléctricos que minimizan la incomodidad térmica en los espacios interiores. Este hallazgo es relevante y fortalece la necesidad de recurrir a esta estrategia bioclimática, especialmente en ciudades vulnerables al cambio climático.

**Palabras clave:** techo verde, confort térmico, clima cálido, estrategia pasiva, cambio climático.

## Thermal performance of a green roof in a hot, dry climate: Culiacán Rosales, Sinaloa, México

### Abstract

The growth of cities and the consequences increases the urban heat island effect, which impacts the air temperature both outside and inside buildings. Consequently, energy demand in buildings increases due to the growing use of electrical equipment to improve thermal conditions.

Therefore, this paper presents the results of an experimental evaluation of the thermal behavior of a green roof carried out in May. The experiment used two reinforced concrete slabs, one with a green roof and the other conventional, which served as a control. Both were built in the same building located in the city of Culiacán, which has a warm semi-arid climate.

The parameters measured were solar radiation, air temperature and outdoor humidity, indoor surface temperature of the slabs, and indoor air temperature and humidity. The results show that the thermal gain of the slab decreases significantly through the vegetation cover, which motivates its applicability to reduce the energy consumption of electrical equipment that minimizes thermal discomfort in indoor spaces. This finding is relevant and reinforces the need to use this bioclimatic strategy, especially in cities vulnerable to climate change.

**Keywords:** green roof, thermal comfort, warm climate, passive strategy, climate change.

### INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una realidad presente. La temperatura global ha aumentado de forma sostenida, provocando alteraciones importantes en el equilibrio climático del planeta. Este fenómeno se relaciona directamente con la actividad humana, principalmente por la emisión constante de gases de efecto invernadero, la sobreexplotación de recursos naturales y el cambio en el uso del suelo. Uno de los impactos más relevantes es el incremento de la temperatura ambiental, que a su vez afecta el comportamiento térmico de los espacios construidos, generando mayor demanda energética para su acondicionamiento. Como señala el Intergovernmental Panel on Climate Change, “la influencia humana ha calentado el clima a un ritmo sin precedentes en al menos los últimos 2000 años” ([IPCC] 2023), lo que ha intensificado fenómenos extremos como olas de calor, sequías y el aumento del nivel del mar.

Como consecuencia del calentamiento global, se ha observado un incremento de las temperaturas en las zonas urbanas, lo cual influye directamente en las edificaciones, elevando la demanda energética para enfriar (Santamouris, 2014). Las ciudades enfrentan una creciente vulnerabilidad ante el cambio climático, la elevación de las temperaturas es uno de los efectos más notorios. En regiones de clima cálido, este fenómeno se acen-

túa por la expansión urbana, el uso de materiales de alta inercia térmica, la reducción de áreas permeables y la falta de áreas verdes como factores que intensifican el efecto isla de calor urbano (Libertun, 2023).

Frente a este panorama, los techos verdes emergen como una estrategia pasiva y multifuncional que no sólo mejora el desempeño térmico de las edificaciones, sino que también contribuye a la sostenibilidad urbana mediante la regulación microclimática, la mejora de la calidad del aire, la reducción de escorrentías, el aislamiento acústico y el aumento de la biodiversidad urbana (López-González *et al.*, 2020).

El presente estudio analiza el comportamiento térmico de dos losas de concreto armado ubicadas en un mismo edificio en la ciudad de Culiacán, Sinaloa: una cubierta con sistema de techo verde y otra con características convencionales. Ambas fueron evaluadas durante el mes de mayo, bajo las condiciones climáticas propias de una región cálida seca. El objetivo es generar evidencia que respalde la implementación del techo verde como una estrategia pasiva de adaptación al cambio climático en entornos urbanos, ya que diversos estudios han demostrado que los techos verdes no sólo contribuyen a la mitigación del efecto de isla de calor urbano, sino que también ofrecen beneficios térmicos, energéticos y ambientales significativos, lo que los convierte en una solución sostenible particularmente útil en climas cálidos (Berardi *et al.*, 2014).

## Antecedentes

El cambio climático es un fenómeno inequívoco que representa una amenaza global urgente. Entre 1850 y 2019, las actividades humanas –como la emisión de gases de efecto invernadero, la sobreexplotación de los recursos naturales y la transformación del uso del suelo– han sido responsables de un aumento aproximado de 1,1 °C en la temperatura media global (IPCC, 2021). Este calentamiento ha provocado alteraciones graves en los patrones climáticos, manifestándose en fenómenos meteorológicos extremos, elevación del nivel del mar e impactos sobre la producción de alimentos (IPCC, 2021; Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2021). En particular, el informe del IPCC señala que, sin reducciones significativas de emisiones, la temperatura superará pronto los 1,5 °C, intensificando los riesgos climáticos en escala global.

Por otro lado, las investigaciones sobre los techos verdes generan evidencia sobre sus múltiples beneficios, haciendo que su implementación sea viable. Un metaanálisis en ciudades mediterráneas concluyó que los techos verdes pueden reducir las temperaturas exteriores hasta 7,4 °C durante el verano, y de 0,2 a 2,3 °C en interiores, con ahorros energéticos anuales del 10% al 34.7% (De Cristo *et al.*, 2025). Adicionalmente, datos obtenidos en condiciones reales en Querétaro, México, mostraron una reducción promedio de 6 °C en temperatura interior respecto al control y un retraso en el escurrimiento pluvial del 80%, evidenciando beneficios mixtos térmicos e hidrológicos (Pérez, 2010).

Las investigaciones en ciudades áridas, como Mendoza (Argentina), han comparado techos reflectivos y verdes, encontrando que estos últimos reducen la temperatura del aire urbano en aproximadamente 2,1 K, frente a 1,6 K con la opción reflectiva (Alchapar *et al.*, 2018). Así mismo, un estudio global refleja que la implementación de infraestructuras verdes –como techos y muros vegetales– puede disminuir la temperatura del aire urbano hasta en 11,3 °C y reducir la transmitancia térmica en edificios en 0,27 W/m<sup>2</sup>·K, además de secuestrar carbono y gestionar el escurrimiento (Barriuso y Urbano, 2021).

En particular, los techos verdes se presentan como alternativas naturales de infraestructura resiliente: ofrecen evapotranspiración, aislamiento térmico y captación de lluvia, además, actúan como soluciones basadas en la naturaleza para mejorar el clima urbano, ser más eficientes energéticamente y reforzar la infraestructura contra inundaciones.

## MARCO TEÓRICO

### Concepto y clasificación

Un techo verde es un sistema pasivo que se construye en las azoteas de las edificaciones, es decir, donde se recibe la mayor radiación solar directa durante el día. Para garantizar su efectividad con múltiples ventajas ambientales, está integrado por un conjunto de capas junto con el sustrato y la vegetación. Sobre esto, la Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-013-RNAT-2007 establece las especificaciones técnicas para la instalación de sistemas de naturación (techo verde) en la Ciudad de México, dentro de las cuales contempla que es necesario utilizar capa impermeabilizante, anti-raíz, drenante, filtrante, sustrato y vegetación (Norma Ambiental para el Distrito Federal [NADF], 2008).

Además, contempla una clasificación de tres tipos distintos: extensivos, los cuales generan una carga adicional promedio entre los 110-140 kg/m<sup>2</sup>, semi intensivos con una carga de hasta 250 kg/m<sup>2</sup> e intensivos, en los que la carga adicional es mayor a los 250 kg/m<sup>2</sup>. La diferencia depende del espesor de capa de sustrato, lo que lleva a colocar en ellos diferentes especies de vegetación como crasuláceas, pastos, arbustos y árboles que no excedan los cuatro metros de altura, por lo cual es de suma importancia que se atiendan las condicionantes, por ejemplo, todo debe ser apto a la región donde se implemente, la estructura debe tener la resistencia necesario para la carga adicional y dar el mantenimiento requerido según la clasificación (NADF, 2008).

### Mecanismos de mitigación térmica

#### a) Evapotranspiración

El agua del sustrato se evapora y reduce la temperatura del techo (Cascone *et al.*, 2019).

b) Aumento del albedo

Su reflectividad (0.70–0.85) es mucho mayor que la de cubiertas convencionales (<0.20), lo que contribuye a disminuir la absorción de calor solar. Esto se consigue gracias al aislamiento y masa térmica, pues el sustrato y las plantas actúan como barreras térmicas que moderan el flujo de calor hacia el interior.

c) Mitigación de la isla de calor urbana

A escala urbana, los techos verdes disminuyen la temperatura superficial y aérea, por lo tanto, contribuyen a mitigar la isla de calor. Un metaanálisis de 89 estudios mostró reducciones de hasta 3 °C en climas secos y alrededor de 1 °C en climas cálidos-húmedos (Jamei *et al.*, 2021). Modelos urbanos (por ejemplo, en Chicago) indican que aumentar la cobertura de techos verdes reduce el flujo de calor sensible, eleva el flujo de calor latente y disminuye las temperaturas tanto diurnas como nocturnas (Sharma *et al.*, 2016).

d) Efectos en eficiencia energética y confort interior

En verano se ha observado que el uso de un techo verde puede reducir la temperatura del interior en 2 °C, disminuir la variación térmica del techo en 30 °C, y reducir la demanda energética anual en hasta un 6% (Jaffal *et al.*, 2012).

## Diseño según las condiciones climáticas

El desempeño de los techos verdes varía según el clima local, diseño y clasificación. En climas mediterráneos (cálidos y secos), es fundamental emplear sustratos resistentes, especies de la región ya que son tolerantes a la sequía, sistemas eficientes de riego y considerar la profundidad adecuada del sustrato para que las plantas puedan desarrollarse.

Los estudios indican que, combinando buena aislación y vegetación, se logra maximizar el efecto térmico tanto en invierno como en verano. Por lo que, en los beneficios laterales y relacionales, más allá del alivio térmico, los techos verdes procuran mitigación del escurrimiento pluvial, mejora de la calidad del aire, soporte de biodiversidad urbana y proyección estética y psicológica positiva (Think, 2024).

## Componentes del techo verde aplicado

Se partió de la información base de la NADF-013-RNAT-2007 para la construcción del techo verde y se tomó en cuenta la información brindada por investigadores de la Universidad Autónoma de Chiapas (UNACH), “El doctor Gabriel Castañeda Nolasco [...] señala que ‘en los techos verdes se utiliza plástico PET para atrapar las raíces y evitar que rompan los techos’” (Vanguardia, 2024). Es decir, para el material usado en la capa filtrante se utilizaron botellas PET para retener el agua y que las raíces de la vegetación fueran atrapadas en su interior cuando buscaran humedad. Además, se diseñó una estructura especial para el techo verde donde se hizo la investigación experimental (Figura 1).

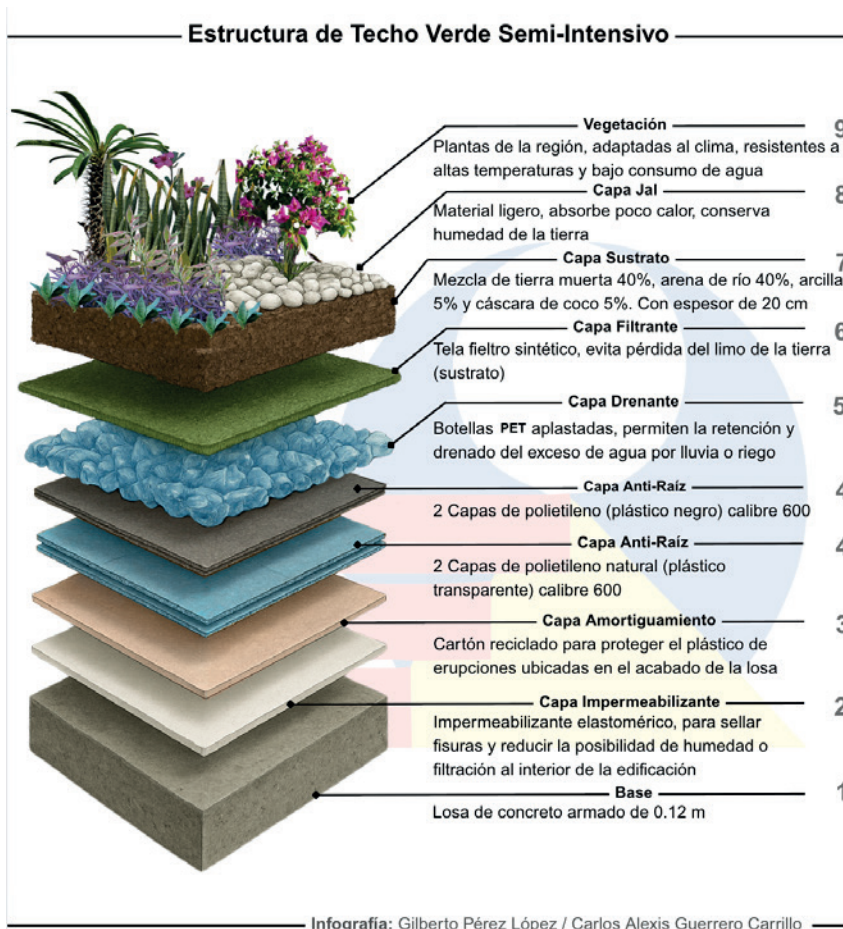


Figura 1. Estructura de techo verde semi intensivo. Fuente: por Gilberto Pérez López y Carlos Alexis Guerrero Carrillo.

Se incluyó una capa de amortiguamiento hecha con cartón reciclado debido a que el acabado en la losa presentaba algunas imperfecciones. Esta capa aumentó el aislamiento térmico. En total se colocaron cuatro capas de plástico de polietileno para aumentar la protección por posible humedad en la losa y una capa de Jal por ser un material ligero que ayuda a mantener la humedad y a concentrar un mínimo de calor gracias a sus características porosas.

### Comportamiento térmico y confort en climas cálidos

En regiones con clima cálido se requieren estrategias pasivas para reducir la ganancia térmica que produce mayor calor al interior de las edificaciones. Las azoteas son el elemento construido con mayor ganancia térmica por recibir la mayor radiación solar prácticamente todos los días del año. Por otro lado, un denso techo de pasto en verano tiene un efecto de enfriamiento considerable y en invierno muestra un excelente efecto de aislación térmica (Minke, 2004).

## Estudios previos relevantes

Existen investigación en regiones con clima cálido que han demostrado los beneficios térmicos de los techos verdes. Por ejemplo, un estudio sobre una cubierta verde encima del tejado de un edificio de servicios en las instalaciones de Itecons, en Coímbra, Portugal, revela en sus conclusiones que las cubiertas verdes son una de las posibles soluciones para mitigar los efectos adversos del cambio climático, especialmente en los centros urbanos (Troise, 2024).

En México, con la investigación sobre el efecto térmico de las azoteas verdes en la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila se concluyó que “la amplitud de oscilación de la temperatura interior de la edificación fue menor cuando ésta tiene una azotea verde. [...] Además los resultados muestran que las azoteas verdes contribuyen al ahorro de energía, ya que reduce su consumo hasta en 85%” (Escobedo *et al.*, 2003).

En Torreón Coahuila, donde las temperaturas medias máximas sobrepasan los 31 °C, se hizo un análisis en un módulo de prueba del que se concluyó que “Las mayores diferencias de temperaturas fueron registradas en las temperaturas superficiales siendo hasta nueve grados centígrados de diferencia entre la losa común y la losa con cubierta verde, lo que significa que se disminuye considerablemente la ganancia por radiación interna de la losa” (Quiroa *et al.*, 2020). Estos trabajos refuerzan el valor adaptativo de los techos verdes como estrategia de construcción pasiva desde el ámbito térmico, además del resto de los beneficios que éstos generan.

## METODOLOGÍA

Esta investigación se desarrolló mediante un enfoque experimental y comparativo. Se tomaron dos aulas de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Autónoma de Sinaloa (UAS) en Culiacán Rosales, con características similares en cuanto a dimensiones, materiales, orientación y exposición solar. Ambas aulas tienen losa de concreto armado con la variación de que a una de ellas se le incorporó un techo verde. La idea principal fue registrar la temperatura superficial de las losas en su interior, así como la temperatura y humedad relativa en el interior de cada una para hacer comparativos.

La ubicación del estudio corresponde a las coordenadas geográficas 24° 82'63.3", Latitud Norte y 107°37'99.58" Latitud Oeste, según la clasificación climáticamente de Köppen, se ubica en en el grupo BSh correspondiente a un clima semiárido cálido (estepario cálido), con temperaturas promedio anuales entre 26.2 °C y 33 °C (Salomón *et al.*, 2021).

Como se mencionó anteriormente, el techo verde se construyó en una de las aulas de la Facultad de Arquitectura de la UAS, donde se aprovechó la losa de concreto armado que permitió una carga adicional. Las aulas están en un segundo nivel con azotea a dos aguas con una pendiente del 3% aproximadamente que, por la gravedad, facilita el drenaje del exceso de agua por riego o lluvia. El área del proyecto es de 20 metros cuadrados

aproximadamente (Figura 2), corresponde a la clasificación semi intensivo, cuenta con una capa de sustrato de 20 cm aproximadamente y una variedad de vegetación donde se incluyen arbustos, bugambilias mini moradas, corona de cristo enana y mini, flor del desierto y niña en barco rastrea.



Figura 2. Techo verde en la Facultad de Arquitectura de la UAS.

Para la obtención de datos de temperatura y humedad relativa interior con parámetro a cada hora, se instalaron registradores HOBO, específicamente la pieza -MX1104 (Figura 3). Se trata de un registrador de datos analógico con bluetooth habilitado, mide y transmite datos de temperatura, humedad relativa, luz y exterior de forma inalámbrica. Incluye una entrada analógica externa para conectar diversos sensores adicionales (HOBO, s. f.).



Figura 3. Registrador de datos analógico HOBO MX1104.  
Fuente: HOBO, <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104>

La temperatura del espacio interior se midió con el registrador de temperatura HOBO MX1104, el cual tiene las siguientes especificaciones técnicas (Figura 4):

Sensor de temperatura (MX1104)	
Rango	-20° a 70°C -4° a 158°F
Exactitud	±0,20°C de 0° a 50°C ±0,36 °F de 32 ° a 122 °F
Resolución	0,002 °C a 25 °C 0,004 °F a 77 °F
Deriva	<0,1 °C (0,18 °F) por año

Figura 4. Especificaciones técnicas del HOBO MX1104, sensor de temperatura.  
Fuente: HOBO, <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104>

El mismo equipo midió la humedad relativa del espacio interior con las siguientes especificaciones técnicas (Figura 5):

Sensor de HR (MX1104)	
Rango	0% a 100% a -20° a 70°C (-4° a 158°F); la exposición a condiciones superiores al 95% puede aumentar temporalmente el error máximo del sensor de HR en un 1% adicional
Exactitud	±2,5 % del 10 % al 90 % (típico) hasta un máximo de ±3,5 % incluida la histéresis a 25 °C (77 °F); por debajo del 10 % y por encima del 90 % ±5 % típico
Resolución	0,01%
Deriva	<1% por año típico

Figura 5. Especificaciones Técnicas HOBO MX1104, sensor de humedad relativa.  
Fuente: Elaborada a partir de HOBO, <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104>

La temperatura superficial interior del techo se midió haciendo uso de la sonda temp-06, la cual mide temperatura por contacto, ésta se conecta

al equipo HOBO MX1104. La sonda tiene características que se tomaron en cuenta para la selección de la medición de temperatura superficial interior de las losas, este instrumento ha sido usado en otras investigaciones (Figura 6).

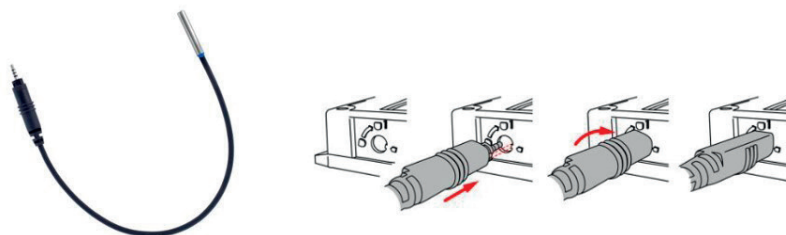


Figura 6. Sonda TEMP-06.

Fuente: HOBO, <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/sd-temp-xx>

Se tomaron en cuentas las características de la sonda TEMP-06 para la medición de la temperatura superficial al interior de la losa, la cuales se describen en la Figura 7.

#### Características

Tecnología de autodescripción para una configuración rápida y sencilla

Conector de bloqueo para garantizar que el sensor esté conectado y permanezca conectado

Rango de medición de  $-40^{\circ}$  y  $100^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}$  a  $212^{\circ}\text{F}$ )

Precisión de  $\pm 0,15^{\circ}\text{C}$  de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 0,27^{\circ}\text{F}$  de  $32^{\circ}\text{F}$  a  $122^{\circ}\text{F}$ )

Figura 7. Características de la sonda TEMP-06.

Fuente: Elaborada a partir de HOBO, <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104#features>

Para la temperatura y humedad relativa ambiente se tomaron registros generados en la estación climatológica de la Facultad de Biología de la Universidad Autónoma de Sinaloa, ubicada en el techo del edificio norte de ésta (Figura 8). La estación está a una altitud de 68.797 y sus coordenadas geográficas de  $24^{\circ} 49' 38.6''$  Latitud Norte y  $107^{\circ} 22' 48.95''$  de Longitud Oeste.



Figura 8. Estación climatológica Facultad de Biología UAS.  
Fuente:

El 21 de mayo fue el día con la temperatura registrada más elevada durante dicho mes en la estación climatológica de la UAS. Se graficó la información correspondiente a las 24 horas del día, donde se muestra la relación temperatura y humedad relativa ambiente. A las 6:00 horas se registró la temperatura más baja (20.0 °C) y la humedad relativa más elevada (58%), mientras que a las 14:00 horas se registró la temperatura más elevada (38.1 °C) y a las 13:00 horas fue la humedad más baja (18%). Coincide que a menor temperatura mayor humedad y viceversa (Figura 9).

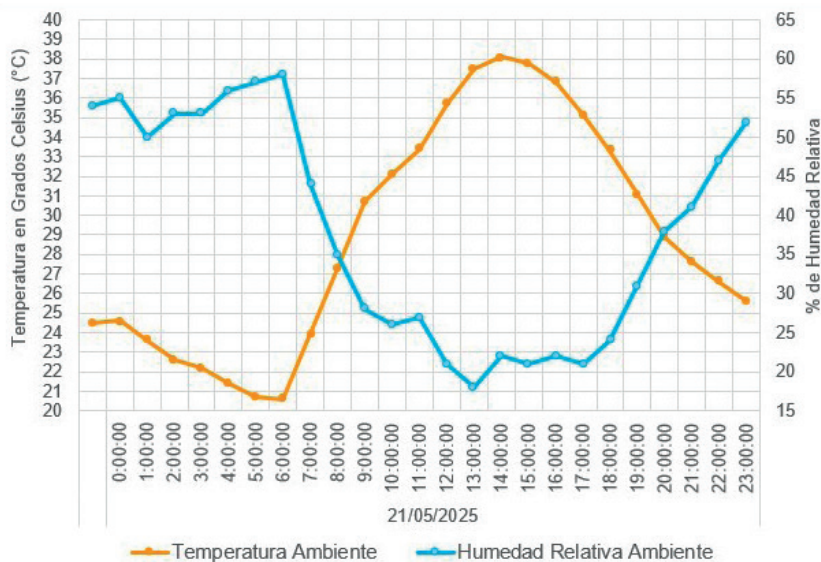


Figura 9. Relación temperatura y humedad relativa ambiente.  
Fuente: El monitoreo se realizó en intervalos regulares (cada hora) durante el mes de mayo de 2025, capturando datos representativos de los ciclos térmicos diarios.

## RESULTADOS

### Comportamiento térmico de losas y ambiente en relación con la radiación solar el 21 de mayo de 2025

La Figura 10 muestra la evolución horaria del comportamiento de dos tipos de losa: una con techo verde (losa TV) y otra sin vegetación (losa STV), comparando la temperatura ambiente y la radiación solar durante el 21 de mayo de 2025. La temperatura de la losa sin vegetación (curva roja) presenta un notable aumento a partir de las 08:00 h y alcanza su máxima a las 16:00 h con aproximadamente 44 °C, coincidiendo con el pico de radiación solar, alrededor de 834 W/m<sup>2</sup>. En contraste, la losa con techo verde (curva verde) mantiene una temperatura casi constante durante todo el día y oscila ligeramente entre 28 °C y 29,6 °C. Esto evidencia su capacidad de amortiguación térmica.

La temperatura ambiente (curva naranja) también responde al ciclo solar y alcanza una máxima de 38.1 °C a las 15:00 h. La curva de radiación solar (área amarilla) muestra un perfil típico que inicia alrededor de las 07:00 h, con su punto máximo entre las 13:00 y 14:00 h, para luego descender progresivamente hasta desaparecer al anochecer.

Este comportamiento confirma que el sistema de techo verde contribuye significativamente a la estabilidad térmica del interior del espacio, ya que atenúa el ingreso de calor durante las horas de mayor exposición solar.

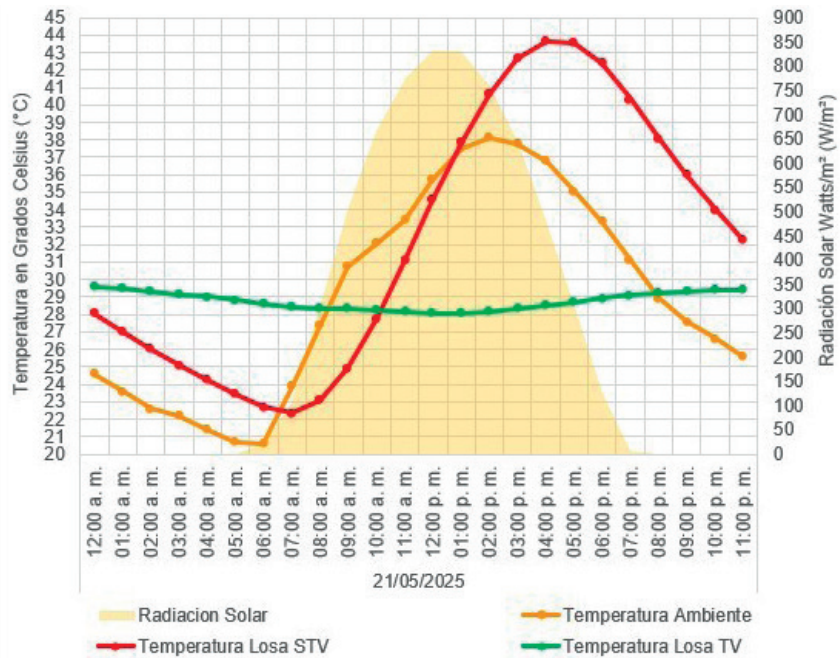


Figura 10. Comportamiento térmico de lasas y ambiente en relación con la radiación solar.

Fuente: Gráfico generado en Excel con información térmica de las sondas conectadas a registradores HOBO y la radiación solar registrada en la estación climatólogica de la UAS.

### Comportamiento térmico interior comparativo entre espacios con y sin techo verde frente a la temperatura ambiente

La Figura 11 muestra la evolución horaria de la temperatura ambiente (curva naranja) y las temperaturas interiores registradas en dos espacios: uno con techo convencional (Losa STV, curva amarilla) y otro con techo verde (Losa TV, curva verde), durante el 21 de mayo de 2025.

Durante las primeras horas del día (00:00-06:00 h), se observa que la temperatura ambiente disminuye progresivamente hasta alcanzar un mínimo de 20.6 °C, mientras que la temperatura en los espacios interiores disminuye ligeramente en ambos, aunque el espacio interior con techo verde sostiene una temperatura mayor entre 1.5 y 3°C arriba del espacio sin techo verde.

A partir de las 08:00 h, la temperatura ambiente incrementa rápidamente hasta alcanzar su valor máximo de 38.1 °C a las 14:00 h. En contraste, el espacio con techo verde muestra poca variación en su temperatura y alcanza una máxima de 30.7 °C, mientras que el espacio sin vegetación alcanza los 33.9 °C, es decir, 3.2 °C por encima del que tiene techo verde.

La diferencia térmica entre ambos espacios interiores se acentúa entre las 13:00 y 17:00 h, justo en las horas de mayor radiación solar. Esta comparación evidencia el efecto moderador del sistema de techo verde, que actúa como barrera térmica frente a las condiciones externas extremas.

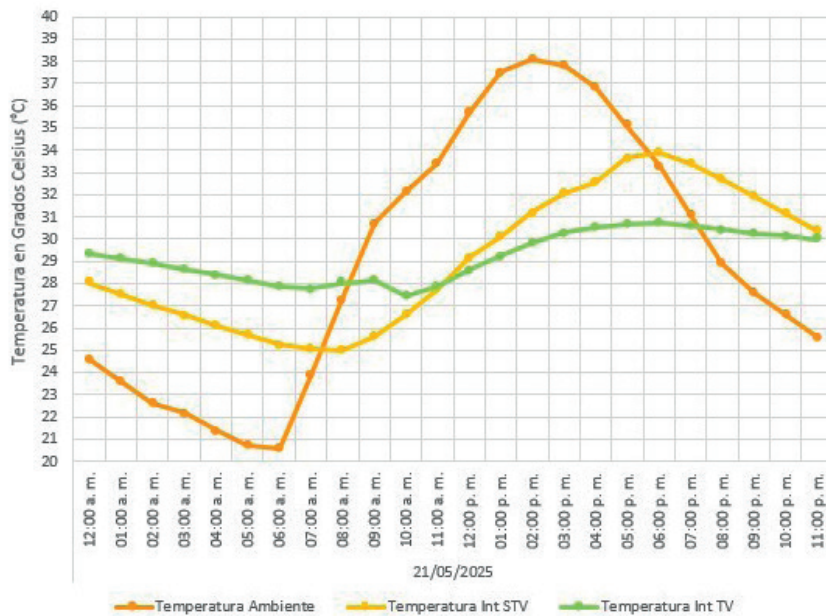


Figura 11. Comportamiento térmico interior comparativo entre espacios con y sin techo verde frente a la temperatura ambiente.

Fuente: Gráfico generado en Excel con información térmica de los registradores HOBO y la temperatura ambiente registrada en la estación climatológica de la UAS.

## Comparación de la humedad relativa en ambiente exterior y espacios interiores con y sin techo verde

La Figura 12 muestra la variación horaria de la humedad relativa (HR) registrada en el ambiente exterior (curva azul), en el espacio con losa sin vegetación (curva rosa) y en el espacio con techo verde (curva verde), el 21 de mayo de 2025. Durante la madrugada (00:00 – 06:00 h), la HR ambiente fluctúa entre 50% y 58%, mientras que los espacios interiores presentan valores más bajos y estables: aproximadamente 34.3% y 38.6% en el STV y 35.6% a 36% en el TV.

A partir de las 06:00 h, la HR exterior disminuye rápidamente conforme aumenta la temperatura ambiente hasta alcanzar un mínimo cercano al 18% alrededor de las 13:00 h. En cambio, el espacio con techo verde mantiene un rango más estable, con una HR media entre 31% y 36%, con menor variación a lo largo del día. Por otro lado, la losa sin vegetación experimenta una mayor caída ya que registra valores mínimos por debajo del 26.3% entre las 16:00 y 18:00 h.

Esta comparación indica que el sistema de techo verde favorece un microclima interior más húmedo y estable, lo que mejora el confort higrotérmico en comparación con un espacio sin vegetación, particularmente durante las horas de mayor carga térmica.

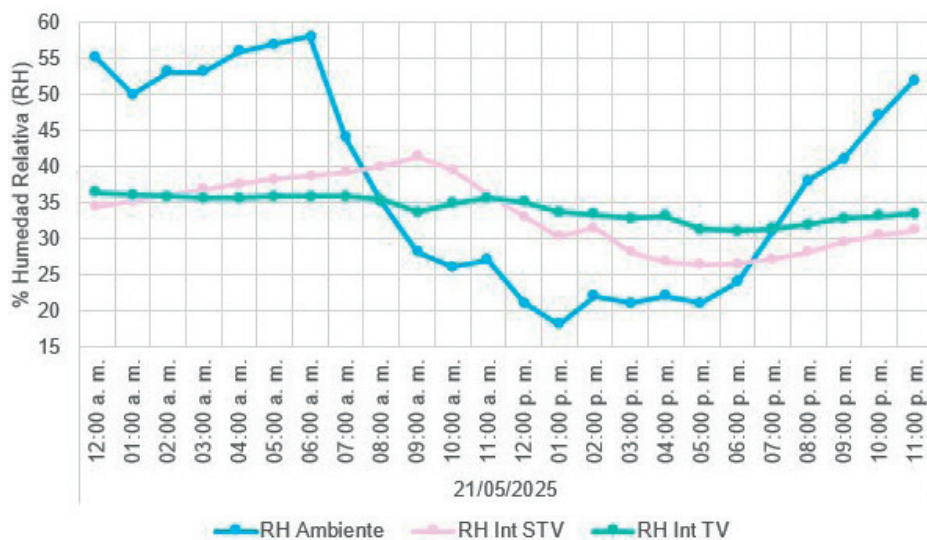


Figura 12. Comparación de la humedad relativa en ambiente exterior y espacios interiores con y sin techo verde.

Fuente: Gráfico generado en Excel con información de los registradores HOBO y la humedad relativa registrada en la estación climatológica de la UAS.

## Análisis comparativo e interpretativo de resultados

El comportamiento térmico y de humedad registrado en esta investigación nos permite comprobar diferencias sustanciales entre el espacio con techo verde (TV) y el espacio con losa sin vegetación (STV), en relación con las condiciones del ambiente exterior.

### Temperatura

Durante el día, el espacio sin vegetación alcanzó una temperatura máxima de 43,7 °C en la superficie interior de losa y 33,9 °C en el interior del espacio, mientras que el espacio con techo verde presentó una temperatura superficial estabilizada entre 28 y 29,6 °C, y un valor interior máximo de apenas 30,7 °C. Esto representa una diferencia de 3,2 °C en el interior a favor del techo verde, que además mantuvo una curva térmica más plana a lo largo del día. El pico térmico en el STV se genera cuatro horas después de la mayor radiación solar (850 W/m<sup>2</sup>), lo que sugiere una alta transmisión de calor desde la cubierta hacia el interior con un retraso térmico.

Estas variaciones confirman que el techo verde actúa como barrera térmica natural, ya que reduce significativamente el flujo de calor hacia el interior y retrasa el calentamiento. Esta capacidad se debe a su composición vegetal y al sustrato, que promueven fenómenos como la evapotranspiración y el aislamiento térmico.

### Humedad relativa

En cuanto a la humedad relativa, el ambiente exterior experimentó una caída pronunciada desde 58 % hasta 18 % entre las 07:00 y 13:00 h, coincidiendo

con el ascenso térmico. En cambio, el espacio con techo verde mantuvo una HR más estable, entre 31,1 % y 36,4 %, mientras que en el espacio STV se observó una mayor desecación, con niveles mínimos de hasta el 26,3%.

La menor variabilidad de humedad en el espacio con techo verde sugiere una capacidad de regulación higrotérmica más eficiente, probablemente asociada al microclima generado por la vegetación y la menor exposición directa al calor. Esta estabilidad contribuye al confort térmico percibido, ya que evita ambientes interiores secos durante las horas críticas.

### Relación temperatura-humedad

Ambos indicadores muestran que el techo verde no sólo mitiga la temperatura interior, sino que también contribuye a conservar la humedad en niveles más constantes. Esta combinación reduce la sensación térmica percibida y mejora la habitabilidad en entornos calurosos. En contraste, el techo convencional amplifica tanto el calor como la sequedad del aire, lo que incrementa el desconfort térmico.

## CONCLUSIONES

La evaluación térmica e higrométrica a escala real realizada en condiciones climáticas cálidas demuestra que los techos verdes son una estrategia pasiva eficaz para mejorar el desempeño ambiental de las edificaciones. Los resultados indican que el techo verde reduce significativamente la temperatura interior del espacio construido, con diferencias de hasta 3,2 °C respecto a una losa convencional y mantiene su superficie a niveles térmicos más estables. Además, la humedad relativa en el interior también se conserva de forma más equilibrada, evitando los picos de desecación que se presentan en espacios sin vegetación.

Así, los techos verdes contribuyen a un mejor confort higrotérmico, especialmente en horas de alta radiación, al moderar simultáneamente el ingreso de calor y las pérdidas de humedad. Su implementación representa una medida viable y replicable para mitigar los efectos del cambio climático urbano, particularmente en zonas con temperaturas elevadas.

Esta investigación comprueba el potencial de los techos verdes como soluciones basadas en la naturaleza, orientadas a la adaptación climática en ciudades cálidas. Su validación empírica a escala real fortalece la base técnica y científica para su promoción en políticas públicas, diseño urbano y edificación sustentable.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian que el techo verde actúa eficazmente como una solución pasiva de moderación térmica, ya que reduce la temperatura interior hasta en 3,2 °C respecto a una losa sin vegetación. Esta

diferencia coincide con hallazgos reportados en la literatura científica, donde se identifican reducciones similares en climas de calor extremo (Cuevas *et al.*, 2024), aunque con variaciones en magnitud según el contexto climático y el tipo de sistema implementado.

A diferencia de los estudios basados en simulaciones, este análisis a escala real demuestra no sólo una reducción térmica, sino también una mayor estabilidad higrotérmica a lo largo del día, lo que representa un beneficio doble: menor demanda de refrigeración y mejor confort percibido. La humedad relativa en el espacio con techo verde se mantuvo entre 31,1% y 36,4%, mientras que en el espacio sin vegetación descendió por debajo del 26,3%, revelando un ambiente más seco y menos confortable.

Además, se confirma la capacidad del techo verde para desacoplar el comportamiento interior respecto de la radiación solar directa. Mientras la temperatura de la losa convencional se incrementó después del pico de radiación, la cubierta verde mostró un comportamiento más amortiguado, sin alcanzar picos extremos. Este efecto de desfase térmico ha sido documentado por autores como Diana Verónica López Silva (2020) y se ratifica en esta investigación en condiciones propias de climas cálidos.

Si bien los resultados coinciden con tendencias globales, aportan valor añadido al enfocarse en un clima urbano cálido específico, utilizando datos experimentales y no modelos teóricos. Este enfoque permite verificar en condiciones reales lo que la teoría ha propuesto: los techos verdes no sólo enfrían, sino que estabilizan y mejoran el microclima interior. Por lo tanto, la aplicación de techos verdes en contextos similares se refuerza como una estrategia viable y urgente ante el avance del calentamiento global.

## REFERENCIAS

- Alchapar, N. L., Correa, É. N. y Cantón, M. A. (2018). ¿Techos reflectivos o verdes? influencia sobre el microclima en ciudades de zonas áridas. Mendoza, Argentina. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 11(22). <https://doi.org/10.11144/javeriana.cvu11-22.trvi>
- Barriuso, F. y Urbano, B. (2021). Green Roofs and Walls Design Intended to Mitigate Climate Change in Urban Areas across All Continents. *Sustainability*, 13(4), 2245. <https://doi.org/10.3390/su13042245>
- Berardi, U., GhaffarianHoseini, A. y GhaffarianHoseini, A. (2014). State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.10.047>
- Cascone, S., Coma, J., Gagliano, A y Pérez, G. (2019). The evapotranspiration process in green roofs: A review. *Building and Environment*, 147, 337-355. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.024>
- Cuevas Acuña, G. A., Ayala Moreno, J. P., Esquer Peralta, J., Munguia Vega, N. E. y Alvarado Ibarra, J. (2024). Desempeño término de prototipo de techo verde bajo condiciones de calor extremo. *Entreciencias:*

- Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, 12(26), 1-19. <https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2024.26.89127>
- De Cristo, E., Evangelisti, L., Barbaro, L., De Lieto Vollaro, R. y Asdrubali, F. (2025). A Systematic Review of Green Roofs' Thermal and Energy Performance in the Mediterranean Region. *Energies*, 18(10), 2517. <https://doi.org/10.3390/en18102517>
- Escobedo Izquierdo, M. A., Quezada García, S., Cázeres Ramírez, R. I., Polo Labarrios, M. A. y Sánchez Mora, H. (2023). Efecto término de las azoteas verdes en la Ciudad de México, Yucatán y Coahuila. *Ingenierías*, xxvi(95), 34-49. <https://ingenierias.uanl.mx/index.php/i/article/view/799/666>
- HOBO. (s. f.). HOBO Temp/RH/Light/Ext-Analog Data Logger. <https://www.onsetcomp.com/products/data-loggers/mx1104>
- HOBO. (s. f.). Self-Describing Air/Water/Soil Temperature Sensor. <https://www.onsetcomp.com/products/sensors/sd-temp-xx>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Climate Change 2023, AR6 Synthesis Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
- Jaffal, I., Ouldboukhitine, S. E. y Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157-164. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.12.004>
- Jamei, E., Chau, W. H., Seyedmahmoudian, M. y Stojcevski, A. (2021). Review on the cooling potential of green roofs in different climates. *Science of The Total Environment*, 791, 148407. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148407>
- Libertun De Duren, N. R. (25 de octubre de 2023). *Ocho estrategias para adaptar nuestras ciudades al cambio climático*. BID. <https://www.iadb.org/es/blog/desarrollo-urbano-y-vivienda/ocho-estrategias-para-adaptar-nuestras-ciudades-al-cambio-climatico>
- López-González, B. G., Camacho, A., Martínez-Rodríguez, M. C. y Marcelin-Aranda, M. (2020). Techos verdes: una estrategia sustentable. *Tecnología en Marcha*, 33(3), 68-79. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i3.4389>
- López Silva, Diana Verónica. (2020). *Comparación de plantas con diferentes metabolismo en el desempeño término de techos verdes extensivos* [Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3281>
- Minke, G. (2004). *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Editorial Fin de Siglo. <https://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/Arquitectura/minke-gernot-techos-verdes.pdf>
- Norma Ambiental para el Distrito Federal, [NADF-011-AMBT-2007], Establecida en la Gaceta Oficial del Distrito Federal [G.O.D.F.], 24 de diciembre de 2008, (México).

- Organización de las Naciones Unidas. (2021). *Cambio climático*. <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>
- Pérez González, M. L. (2010). *Evaluación del confort término y comportamiento hidrológico en edificios urbanos con techos verdes para regions semiáridas* [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro]. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/917/1/RI004022.pdf>
- Quiroa Herrera, J. A., Castañeda Nolasco, G. y Villanueva Solís, J. (2020). La cubierta verde como estrategia de mitigación en vivienda social ante el cambio climático. En Ceballos S., Villanueva J. y Quiroa J. (dirs.). *Infraestructura verde y planeación urbana para el desarrollo sustentable* (pp. 85-113). Universidad Autónoma de Coahuila, El colegio del Estado de Hidalgo.
- Salomón Montijo, B., Márquez Salazar, G. y Sánchez Bañuelos, R. (2021). Normales climatológicas condicionadas y valores extremos periodos 1995-2020. [https://www.uas.edu.mx/pdf/servicios/clima/Normales\\_climatologicas\\_Fac\\_de\\_Biologia\\_UAS\\_1995-2020.pdf](https://www.uas.edu.mx/pdf/servicios/clima/Normales_climatologicas_Fac_de_Biologia_UAS_1995-2020.pdf)
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- Sharma, A., Conry, P., Fernando, H. J. S., Famlet, A. F., Hellmann, J. J. y Chen F. (2016). Green and cool roofs to mitigate urban heat island effects in the Chicago metropolitan area: evaluation with a regional climate model. *Environmental Research Letters*, 11(6): 064004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/6/064004>
- Think. (20 de noviembre de 2024). *5 razones para considerar tener techos verdes si vives en Mérida*. <https://merida.anahuac.mx/think/techos-verdes-en-merida>
- Troise, M. S. (2023). *Evaluación del rendimiento término de las cubiertas verdes en condiciones reales de instalación* [Trabajo final de máster, Universidad de Coimbra]. <https://upcommons.upc.edu/server/api/core/bitstreams/27ebd42f-12d2-4472-aa35-41b64f91c4ae/content>
- Vanguardia. (6 de septiembre de 2016). *Pon a tu casa una piel verde*. <https://vanguardia.com.mx/vida/pon-tu-casa-una-piel-verde-KO-VG3248406>

