

WELLINGTON SOUZA SILVA E RICARDO VICTOR RODRIGUES BARBOSA

Desempeño térmico de techos en la región semiárida del noreste de Brasil: investigación experimental en celdas de evaluación

Thermal performance of roofs in the semi-arid region of Northeast Brazil: an experimental research in test cells

Wellington Souza Silva

Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Alagoas (2020), graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Alagoas (2018). Pesquisador do Grupo de Estudos da Atmosfera Climática Urbana – GATU. Tem experiência na área de Conforto Ambiental e Desempenho Térmico de Edificações.

Master's degree of Science in Architecture and Urbanism from the Federal University of Alagoas (2020), graduated in Architecture and Urbanism from the Federal University of Alagoas (2018). Researcher of the Urban Climate Atmosphere Study Group – GATU. He has experience in the area of Environmental Comfort and Thermal Performance of Buildings.

wellington-souza94@hotmail.com

Ricardo Victor Rodrigues Barbosa

Professor Associado da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, Doutor e Mestre em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (2009 e 2005, respectivamente), graduado em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade Federal de Alagoas (2002). Líder do Grupo de Estudos da Atmosfera Climática Urbana – GATU. Tem experiência na área de Conforto Ambiental, Desempenho Térmico e Clima Urbano.

Associate Professor at the Faculty of Architecture and Urbanism at the Federal University of Alagoas, Doctor and Master of Science in Environmental Engineering by the São Carlos School of Engineering at the University of São Paulo (2009 and 2005, respectively), graduated in Architecture and Urbanism at the Federal University of Alagoas (2002). Leader of the Urban Climate Atmosphere Study Group – GATU. He has experience in the area of Environmental Comfort, Thermal Performance and Urban Climate.

rvictor@fau.ufal.br

Resumo

Este artigo apresenta os resultados de uma pesquisa sobre desempenho térmico de cinco coberturas, por meio de uma investigação experimental com células-teste instaladas na região semiárida do Nordeste brasileiro. Foram analisadas duas coberturas com telhas (cerâmica e fibrocimento) e três coberturas com laje (laje impermeabilizada, laje impermeabilizada com camada de solo exposta e telhado verde). O método experimental consistiu em registrar os dados da temperatura das superfícies externa e interna das coberturas e da temperatura do ar dentro das células-teste. Os dados foram registrados em um dia representativo do verão. Os resultados obtidos mostraram diferenças relevantes no desempenho térmico das cinco coberturas nas três variáveis analisadas. Observou-se que as características termodinâmicas dos materiais constituintes foram determinantes no comportamento térmico dos revestimentos. O albedo superficial teve forte influência nos resultados da temperatura superficial externa, enquanto a massa térmica das coberturas foi mais significativa nos resultados da temperatura superficial e do ar interno. O telhado verde apresentou o melhor desempenho térmico entre as cinco coberturas nas três variáveis analisadas, destacando-se como a melhor estratégia passiva para mitigar as condições térmicas externas na região semiárida, com características de clima quente e seco.

Palavras-chave: Arquitetura bioclimática; Estratégias passivas; Massa térmica; Telhado verde; Temperatura da superfície.

Abstract

This paper presents the results of a research of the thermal performance of five roof systems, through experimental research with evaluation cells installed in the semi-arid region of north-eastern Brazil. It was analyzed two tiled roofs (ceramics and fiber cement) and three slab roofs (waterproofed slab, waterproofed slab with exposed soil layer, and green roof). The experimental method consists of recording external and internal surface temperature data of the roofs and the air temperature inside the test cells. The data were registered on a representative summer day. The results showed relevant differences in the thermal performance of the five roofs analyzed in the three variables in this research. It was observed that the thermodynamic characteristics of the constituent materials were decisive in the thermal performance of the roofs. The surface albedo a strong influence on the results of the external surface temperature, even though the thermal mass of the roofs was more significant by the results of the surface temperature and the indoor air. The green roof presented the best thermal performance among the five roofs in the three variables analyzed, standing out as the best passive strategy to mitigate external thermal conditions in the semi-arid region, with characteristics of warm and dry climate.

Keywords: *Bioclimatic architecture; Passive strategies; Thermal mass; Green roof; Surface temperature*

Resumen

Este documento presenta los resultados de investigación de desempeño térmico de cinco techos, a través de la investigación experimental con celdas de evaluación instaladas en la región semiárida del noreste de Brasil. Se analizaron dos techos con tejas (cerámica y fibrocemento) y tres techos con losa (losa impermeabilizada, losa impermeabilizada con capa de suelo expuesto y techo verde). El método experimental consistió en registrar datos de temperatura superficial externa e interna de los techos y la temperatura del aire dentro de las celdas de evaluación. Los datos se registraron en un día representativo de verano. Los resultados obtenidos mostraron diferencias relevantes en el desempeño térmico de los cinco techos en las tres variables analizadas en esta investigación. Se observó que las características termodinámicas de los materiales que los componen fueron determinantes en el comportamiento térmico de las variables analizadas. El albedo superficial tuvo una fuerte influencia en los resultados de la temperatura superficial externa, mientras que la masa térmica de los techos fue más significativa por los resultados de la temperatura superficial y el aire interior. El techo verde presentó el mejor desempeño térmico entre los cinco techos en las tres variables analizadas, destacándose como la mejor estrategia pasiva para mitigar las condiciones térmicas externas en la región semiárida, con características de clima cálido y seco.

Palabras clave: Arquitectura bioclimática; Estrategias pasivas; Masa térmica; Techo verde; Temperatura de la superficie.

Introducción

De las superficies de la envolvente de un edificio, el techo recibe la mayor parte de la radiación solar directa, siendo responsable de más de un tercio de la ganancia térmica interna en una casa de una sola planta (OSUNA-MOTTA, HERRERA-CÁCERES y LÓPEZ-BERNAL, 2017). En los países tropicales, la incidencia de la radiación solar es alta durante todo el año debido al ángulo de incidencia de la luz solar (LIZ, 2016). Dornelles (2015) señaló que cuanto menor es la latitud y menor el número de pisos en un edificio, mayor es el porcentaje de radiación solar absorbida por el techo. Por lo anterior, el uso de materiales que permitan controlar la radiación incidente constituye una estrategia preponderante en cuanto a la eficiencia energética del edificio y favorece mejores condiciones de confort térmico para los usuarios.

El uso de tejas es bastante común en Brasil. La cerámica es un buen ejemplo de una técnica utilizada en el país desde la época colonial. Consiste básicamente en tejas de materiales cerámicos producidos a partir de arcilla, instaladas sobre una estructura generalmente de madera. La colocación de las tejas en las cubiertas permite la formación de una capa de aire entre ellas, actuando como aislante térmico para el interior del edificio.

El fibrocemento es otro material de uso frecuente en cubiertas en el país debido al bajo costo de instalación y la alta resistencia mecánica atribuida a la composición del material con fibras vegetales o poliméricas (COELHO, 2017). La baja conductividad y reducida masa térmica del material favorece la rápida ganancia y pérdida de calor de la teja durante el ciclo diario.

Las cubiertas planas, formadas por losas de hormigón sin tejas, también se presentan como posibilidad de cubierta, lo que también permite su uso como terrazas en viviendas. Común en México y Latinoamérica (LOPES, 2007; SAMAYOA; MARTÍNEZ y NOLASCO, 2015), este sistema necesita una atención especial en cuanto a impermeabilización para evitar infiltraciones y patologías en la edificación.

Además de estas cubiertas, existen una gran variedad de tipos de tejas, como las metálicas y termoacústicas, y otros sistemas de cubiertas, como los techos verdes. Estos se han generalizado debido a su capacidad para regular la temperatura interna de los edificios, actuando directamente sobre el intercambio de calor entre el ambiente externo y el interior del edificio (PECK et. al., 1999). Los techos verdes funcionan como dispositivos de almacenamiento de calor en la cubierta y su eficiencia se debe a la alta capacidad térmica asociada a los grandes intercambios de calor latente (PARIZOTTO FILHO, 2010).

Varios estudios han abordado el comportamiento térmico de este sistema de cubierta (LOPES, 2007; SAMAYOA, MARTÍNEZ y NOLASCO, 2015; COMA et. al., 2016; CHAGOLLA-ARANDA et. al., 2017; OSUNA-MOTTA, HERRERA-CÁCERES y LÓPEZ-BERNAL, 2017; FERNANDES et. al., 2018; LIZ, 2016). Vecchia (2005) desarrolló una investigación empírica sobre el comportamiento del sistema de cubierta verde claro (CVL) en relación con otras cubiertas (cerámica, fibrocemento, acero galvanizado y losa de cerámica prefabricada). El estudio se realizó en São Carlos, São Paulo, Brasil. Los datos registrados en los prototipos mostraron un retraso térmico superior a 7 h y un amortiguamiento térmico superior a 20 °C frente a los valores encontrados en otros tres casos analizados.

Santos (2016) estudió dos sistemas de cubiertas verdes con variación de especies vegetales (áloe y cactus), comparándolos con el sistema tradicional con teja cerámica, en Caruaru, Pernambuco, Brasil. Los resultados mostraron un mejor desempeño de la cubierta vegetal en comparación con la teja cerámica en el clima semiárido, mostrándose más eficiente cuando la temperatura externa supera los 34 °C.

Por lo anterior, el estudio tuvo como objetivo analizar el comportamiento térmico de los techos, a través de una investigación experimental con celdas de evaluación instaladas en la región semiárida del noreste de Brasil, en condiciones representativas de verano cálido y seco.

Método

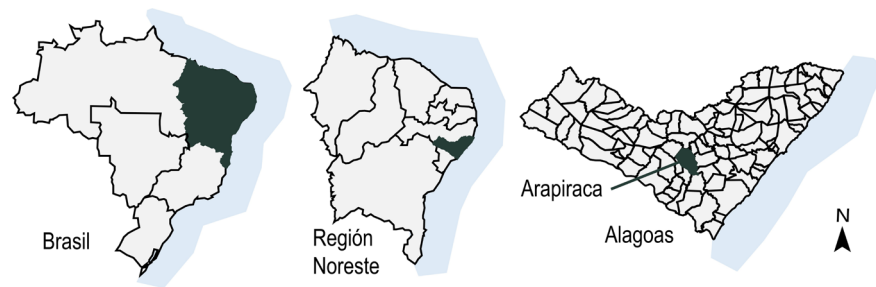
El método consistió en registro de datos de temperatura de la superficie externa e interna y la temperatura del aire interno en cinco celdas de evaluación construidas en el *Campus* de la Universidad Federal de Alagoas, en la ciudad de Arapiraca, Alagoas, Brasil, en la región semiárida del noreste brasileño. El método adoptado se estableció a partir de Vecchia (2005) y Chagolla-Aranda et. al. (2017), en estudios con techos verdes en prototipos y celdas de evaluación, respectivamente.

Caracterización del área de estudio

La ciudad de Arapiraca [Figura 1] se ubica en la mesorregión Agreste, en la porción central del Estado de Alagoas, en las coordenadas geográficas: latitud $9^{\circ} 45'6''$ Sur y longitud $36^{\circ} 39'37''$ Oeste, en 280 m de altitud.

FIGURA 1 – Ubicación de Arapiraca, en la parte central del Estado de Alagoas, en la región Noreste de Brasil.

Fuente: Adaptado de IBGE, 2020.



Se encuentra en la delimitación del Semiárido brasileño con otras 37 ciudades del Estado de Alagoas, tomando como criterio de clasificación la precipitación promedio igual o menor a 800 mm, el índice de aridez de Thornthwaite igual o menor a 0.50 y un porcentaje déficit hídrico diario igual o superior al 60%, considerando todos los días del año, según Resoluciones n° 107, de 27/07/2017 y n° 115, de 23/11/2017 (SUDENE, 2017; 2020).

Según la clasificación climática propuesta por Köppen-Geiger, el clima de Arapiraca es tropical con una estación de verano seca, tipo As (KOTTERK et. al., 2006). Estudios recientes del clima local llevados a cabo por Silva (2019), identificaron dos temporadas características: un período cálido y seco (octubre a marzo), con alta temperatura del aire y reducción significativa de los índices de humedad relativa; y un período cálido y húmedo (abril a septiembre), con temperatura del aire más suave y mayores precipitaciones. La temperatura media anual varía entre 22.1°C y 26.5°C , con amplitudes térmicas diarias entre 8°C (meses húmedos) y 12°C (meses secos). La humedad relativa promedio varía entre el 70% y el 80%, en los meses de mayor humedad, y puede estar por debajo del 20% durante las tardes de los meses secos. Las lluvias ocurren entre abril y septiembre provenientes principalmente de dirección Sureste, con una precipitación promedio anual de 890.0 mm. Las direcciones de viento predominantes son Este (más frecuente en el período seco, de octubre a abril) y Sureste (más frecuente en el período húmedo, de mayo a septiembre), con velocidad promedio de vientos suaves (1.6 a $3.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) y saludable (3.4 a $5.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) (SILVA, 2019).

Descripción de las celdas de evaluación y sistemas de cubiertas

Las celdas de evaluación comprenden un volumen de aire interno de aproximadamente 1.0 m^3 . Se implantaron en el sitio de manera intercalada, espaciadas a una distancia de 3.2 m a 4.0 m, de modo que no influyeran mutuamente en el sombreado y obstrucción de la ventilación, considerando, para ello, la trayectoria solar y la dirección del viento predominante en la región [Figura 2]. Según Givoni (1998), el uso de modelos reducidos puede reproducir las temperaturas internas de los edificios siempre que los elementos de la envolvente del edificio sean los mismos, considerando materiales, espesores etc. Así, los muros de las celdas de evaluación se construyeron con bloques cerámicos de $9 \times 14 \times 19 \text{ cm}$, colocados con mortero de cemento y arena media, recubiertos con revoco de 1.5 cm de espesor por ambos lados y pintado con cal en el exterior. El piso es de hormigón. Tiene una única abertura orientada al Este, sellada con una puerta de madera de $45 \times 85 \text{ cm}$.

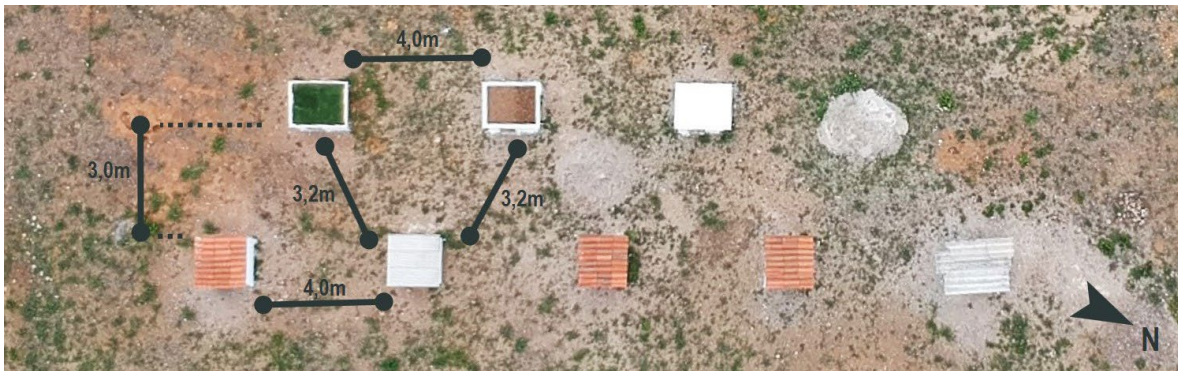


FIGURA 2 - Implementación de celdas de evaluación en el sitio experimental.

Fuente: Adaptado de VEIGA, 2018.

Se compararon cinco techos: teja cerámica (TC); teja fibrocemento (FI); losa impermeabilizada (LI); losa impermeabilizada con 8.0 cm de suelo expuesto (SO) y techo verde (TV). Todos los techos tienen una inclinación del 20% hacia el norte.

La definición de los tipos de cubiertas analizadas en esta investigación se debió a que las tejas cerámicas (TC) y fibrocemento (FI) son sistemas convencionales en la región y los principales techos utilizados en Brasil (LOPES, 2007). La losa impermeabilizada (LI) puede ser una estructura base para la implementación de un techo verde. Este techo fue analizado con el fin de identificar cambios en su desempeño térmico con la adición de una capa de suelo expuesto (SO) y con la adición de los otros componentes de un techo verde, como drenaje y vegetación (TV).

La cubierta con suelo expuesto (SO) tuvo como objetivo analizar la influencia de la masa térmica del suelo, presentándose como una posibilidad para el desarrollo de un techo verde formado a partir del crecimiento de vegetación espontánea. Fitchett, Govender y Vallabh (2019) utilizaron un techo similar para comparar el desempeño del techo verde en la ciudad de Johannesburgo, Sudáfrica.

La definición del sistema de techo verde (TV) se debió a que es una cubierta generalizada en la literatura por sus beneficios térmicos para las edificaciones, aunque los estudios con este sistema de cubierta en las regiones semiáridas de Brasil aún son escasos.

Para la célula de evaluación con techo verde, optamos por la instalación de un sistema sencillo de techo verde extensivo debido a su fácil aplicación, compuesto por: arcilla expandida (2.0 cm) como capa de drenaje, manta de jardín (filtro), sustrato comercial (6.0 cm) y *Zoysia japonica* (hierba esmeralda) como especie vegetal. El mantenimiento de lo techo verde consistió en el riego diario realizado a las 4:30 pm.

La Figura [3] ilustra el diseño de la célula de evaluación y los cinco sistemas de cubierta utilizados.

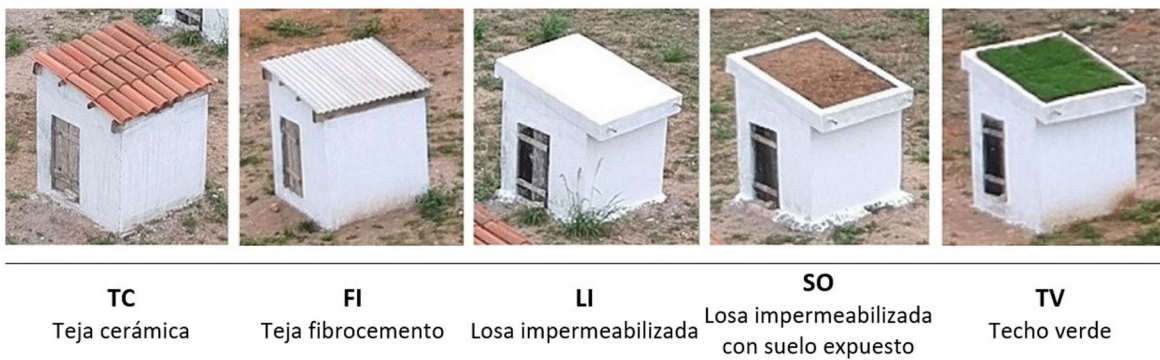
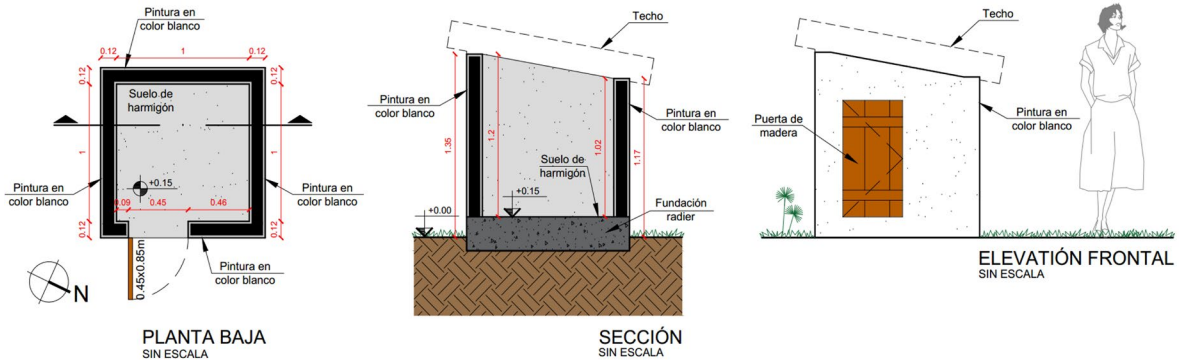


FIGURA 3 – Esquema con dimensionamiento de las celdas de evaluación y los cinco tipos utilizados.

Fuente: Elaboración propia.

Registro de datos

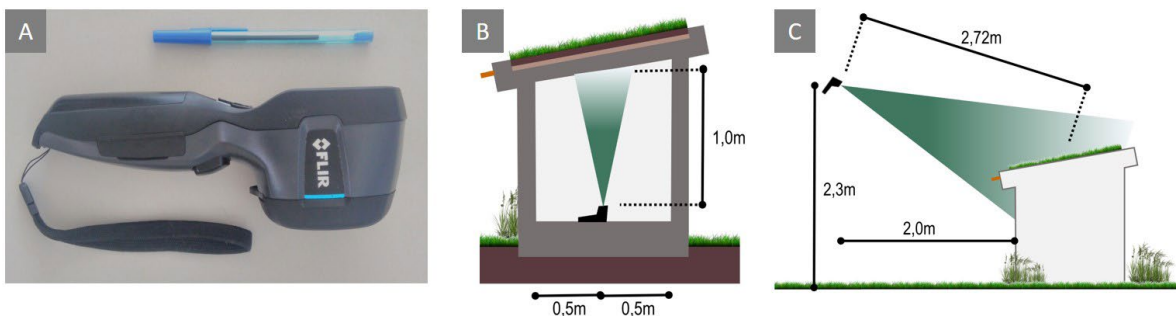
Se registraron las temperaturas superficiales internas ($T_{s.in}$) y externas ($T_{s.ex}$) de los techos, recolectados en el intervalo de 3 h; y la temperatura del aire interior de la célula de evaluación ($T_{a.in}$) y el ambiente externo ($T_{a.ex}$), con registros por hora.

Las temperaturas de la superficie se obtuvieron con imágenes termográficas registradas con una cámara termográfica FLIR® Systems FLIR i7 [Figura 4a], con resolución infrarroja de 120 x 120 píxeles y precisión de ± 2.0 °C para una temperatura ambiente entre 10 °C a 35 °C (FLIR, 2010).

Para registrar la temperatura de la superficie interna ($T_{s.in}$), la cámara se colocó cerca del piso de la célula de evaluación, aproximadamente a 1.0 m de la cubierta [Figura 4b]. Los registros de la temperatura superficial externa ($T_{s.ex}$) se realizaron a una distancia promedio de 2.72 m desde el punto central en el lado externo del techo (Figura 4c). Las imágenes se procesaron en el *software* FLIR Tools, vinculado al equipo, lo que permitió ajustar la paleta de colores para *rainbow* y establecer los límites de temperatura en 17 °C (min) y 50 °C (máx.), determinados a partir de los valores mínimos y máximos registrados en lo techo. El *software* también hizo posible encontrar valores promedio de las imágenes grabadas, utilizadas en el análisis de datos.

FIGURA 4 – (a) Cámara termográfica FLIR i7 y posicionamiento del equipo para el registro termográfico de (b) superficies internas y (c) externas.

Fuente: Elaboración propia.



Se utilizaron registradores de datos HOBO® UX100-003 de ONSET® para registrar la temperatura del aire interior ($T_{a.in}$) [Figuras 5a y 5b]. El equipo se colocó en el centro geométrico del espacio interno de las celdas de evaluación, a 0,50 m de las envolventes externas, fijado sobre un soporte de madera con base metálica. Los datos de temperatura del aire externo ($T_{a.ex}$) fueron recolectados por el registrador de datos HOBO® U23-003 de ONSET® [Figuras 5c y 5d], adaptado para la recolección de variables externas protegidas de la radiación solar directa y la precipitación, instalado en 3,0 m del suelo, en un poste de hormigón a 17,0 m de las celdas de evaluación. Ambos dispositivos se utilizaron para el registro continuo de las temperaturas del aire, totalizados en promedios horarios, con una precisión de ± 0.21 °C (0 °C a 50 °C) (ONSET, 2020a; 2020b).

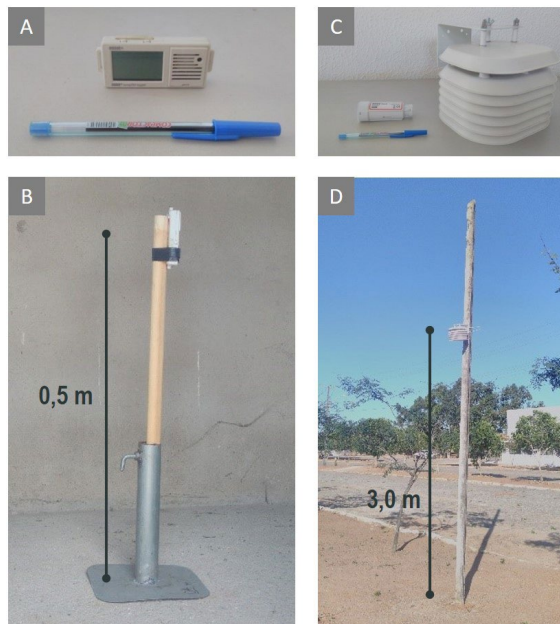


FIGURA 5 – (a, b) UX100-003 y (c, d) HOBO® U23-003 instalados para monitorear la temperatura del aire interior y exterior, respectivamente.

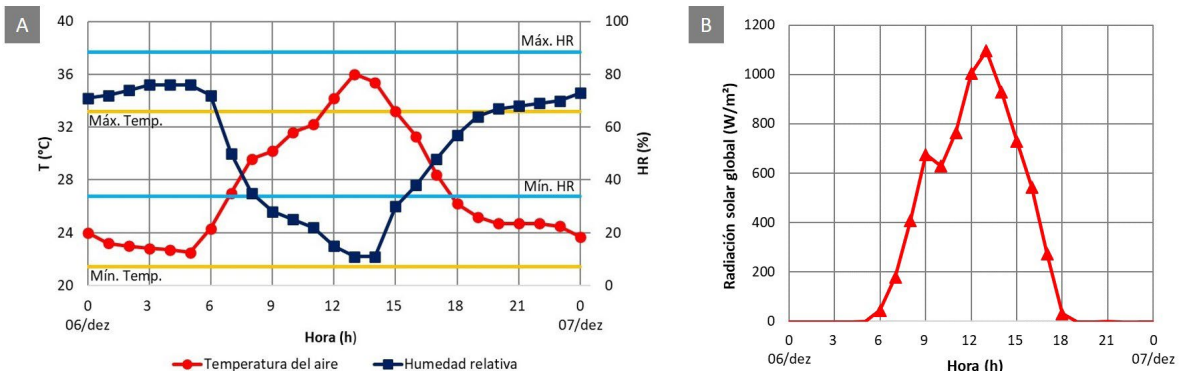
Fuente: Elaboración propia.

Periodo de registro de datos

Los datos se registraron el 06/12/2018. La estación meteorológica automática de superficie (Código OMM: 81996) del Instituto Nacional de Meteorología (INMET), instalada en la región, registró temperatura del aire con un máximo de 36.0 °C, a las 1 pm, superior al promedio esperado para el diciembre (33.2 °C). La humedad relativa del aire alcanzó un mínimo de 11%, a la 1 pm y a las 2 pm, por debajo del promedio esperado de 33% [Figura 6a]. Los valores medios mensuales fueron obtenidos por Silva (2019). Los registros de radiación solar global muestran condiciones de cielo despejado, parcialmente nublado a última hora de la mañana, con un máximo diario de 1096,4 W/m² [Figura 5b]. Por lo anterior, el día de registro de datos se puede caracterizar como un día representativo del verano – período cálido y seco –, en el contexto climático de la región semiárida en estudio.

FIGURA 6 – (a) Gráfico de temperatura del aire y humedad relativa al 06/12/2018 frente a los valores máximos y mínimos mensuales del mes de diciembre, según Silva (2019); (b) radiación solar global (W/m²) el 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.



Análisis y discusión de resultados

Temperatura de la superficie externa

Las imágenes termográficas permiten visualizar la radiación infrarroja emitida por los objetos, resultante de la temperatura superficial de los techos. En la Figura [7] se presentan imágenes termográficas externas de las cubiertas en las que es posible distinguir los diferentes comportamientos térmicos de los techos a lo largo del día. La Figura [8] muestra la temperatura superficial externa promedio (Ts.ex).

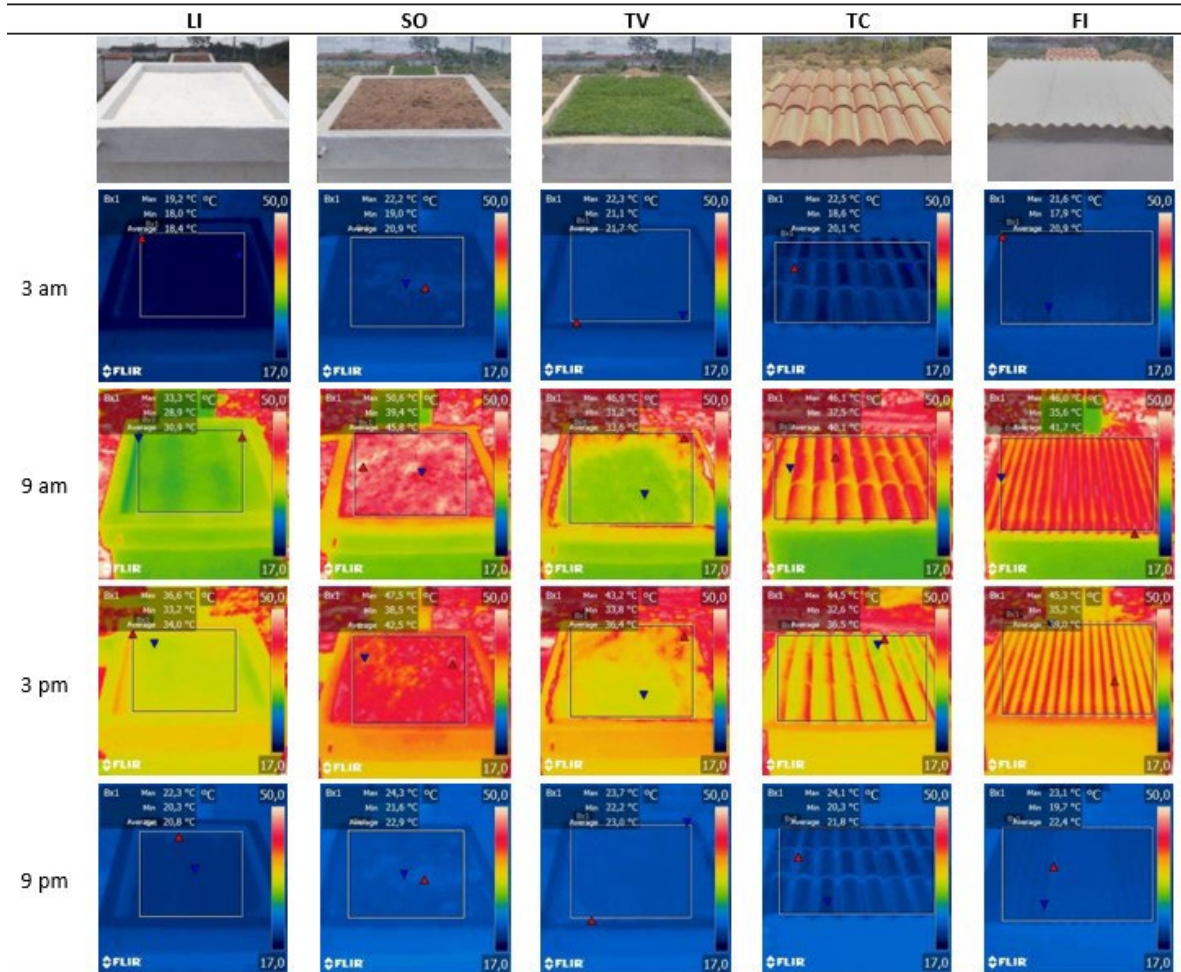
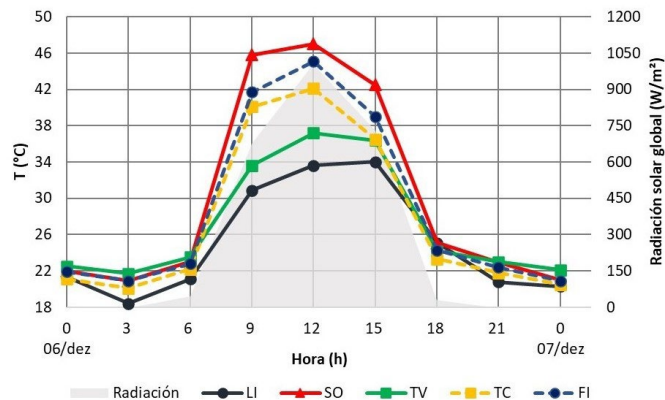


FIGURA 7 –Imágenes termográficas externas de las cubiertas a las 3 am, 9 am, 3 pm y 9 pm del 06/12/2018..

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8 – Comportamiento de Ts.ex en cobertura el 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.



Durante el amanecer, se reducen las diferencias de temperatura superficial promedio entre techos, con un máximo de 3.3 °C, a las 3 am, entre la losa impermeabilizada (LI) y el techo verde (TV). Sin embargo, con la incidencia de la radiación solar durante el día (entre las 6 am y las 6 pm), las características termodinámicas de los materiales constituyentes y la superficie de las cubiertas, como el albedo, tuvieron una fuerte influencia en el comportamiento térmico de los techos. En las horas con radiación solar, las diferencias entre los techos alcanzaban un pico de 14.9 °C, entre la losa impermeabilizada (LI) y con suelo expuesto (SO), a las 9 am, y 13.0 °C, entre los mismos techos, en relación al máximo alcanzado.

Durante el día, las temperaturas superficiales externas más bajas se registraron en la losa impermeabilizada (LI), con una máxima de 34.0 °C (3 pm), seguida del techo verde (TV), con una máxima de 37.2 °C (12 pm). En los otros techos, la temperatura máxima de la superficie fue superior a 40 °C.

Los resultados obtenidos en la losa impermeabilizada (LI) por la incidencia de la radiación solar se deben, especialmente, al alto albedo de la superficie – 0,90 (DORNELLES, 2015), debido al color blanco resultante de la capa impermeabilizante.

El techo verde (TV), a pesar de tener un albedo bajo – 0,25, según Oke (1987), presentó menor calentamiento superficial favorecido por el riego de la tarde anterior, retenido por las raíces en el sustrato y por los procesos de evapotranspiración y fotosíntesis de la planta, a diferencia con losa impermeabilizada con suelo expuesto (SO), en el que el bajo albedo combinado con la baja humedad en la capa de suelo proporcionaba un mayor calentamiento superficial de la cubierta. Fitchett, Govender y Vallabh (2019), encontraron resultados similares, en los que la temperatura en la superficie con suelo expuesto alcanzó los 41.06 °C, mientras que en el techo verde la temperatura superficial alcanzó solo 28.08 °C.

En comparación con el sistema de teja cerámica convencional (TC), la losa impermeabilizada (LI) y el techo verde (TV) mostraron diferencias en la temperatura superficial, alrededor de 8.1 °C y 4.9 °C, respectivamente, en el momento de mayor calentamiento. Esta diferencia fue aún mayor si se compara con la teja de fibrocemento (FI), cuyos valores alcanzan los 11.1 °C y 7.9 °C, respectivamente, en el momento de mayor calentamiento.

La losa impermeabilizada con suelo expuesto (SO) presentó las mayores temperaturas superficiales externas diurnas (47 °C, a las 12 pm), cuyo albedo de 0.20 proporcionó mayor absorción de la radiación solar incidente (ASSIS, SIRQUEIRA y BAMBERG, 2013), seguido por la teja de fibrocemento (FI) y la teja cerámica (TC), con máximas de 45.1 °C y 42.1 °C, respectivamente.

Por la noche, hubo una marcada reducción de la temperatura superficial en todos los techos, con diferencias térmicas entre superficies por debajo de 2.2 °C, destacando la fuerte influencia que ejerce el albedo en el comportamiento térmico de la superficie durante el día, a excepción del techo verde (TV), cuyo comportamiento está relacionado con los procesos físico-químicos de la vegetación.

En cuanto a las amplitudes térmicas diarias, la losa impermeabilizada (LI) y el techo verde (TV) mostraron resultados similares. En ambos, la variación de la temperatura superficial externa fue cercana a los 15.5 °C, mientras que los otros sistemas presentaron amplitud térmica superior a 20 °C, con énfasis en el sistema con suelo expuesto (SO) que presentó amplitud térmica de 26.1 °C [Tabla 1].

TABLA 1 – Valores máximos, mínimos y amplitud térmica de Ts.ex en los techos el 06/12/2018..

Fuente: Elaboración propia.

Ts.ex	Albedo		T _{máx} (°C)	T _{mín} (°C)	Amplitud térmica (°C)
LI	0.90	Dornelles (2015)	34.0	18.4	15.6
SO	0.20	Assis, Sirqueira y Bamberg (2013)	47.0	20.9	26.1
TV	0.25	Oke (1987)	37.2	21.7	15.5
TC	0.10 – 0.35	Oke (1987)	42.1	20.1	22.0
FI	0.52	Couto (2019)	45.1	20.9	24.2
Ta.ex	-		33.9	22.5	11.4

Temperaturas de la superficie interna

Las imágenes termográficas internas [Figura 9] muestran una marcada diferencia de comportamiento entre los sistemas con tejas (TC y FI) y con losa (LI, SO y TV). En los sistemas con tejas, el intercambio de calor se produce más rápido debido a la alta transmitancia térmica combinada con el menor espesor de los materiales, mientras que, en los sistemas con losa, el espesor de la propia losa ya constituye un elemento con mayor masa térmica, favoreciendo una mayor inercia durante el día. La Figura [10] muestra la temperatura superficial interna promedio (Ts.in).

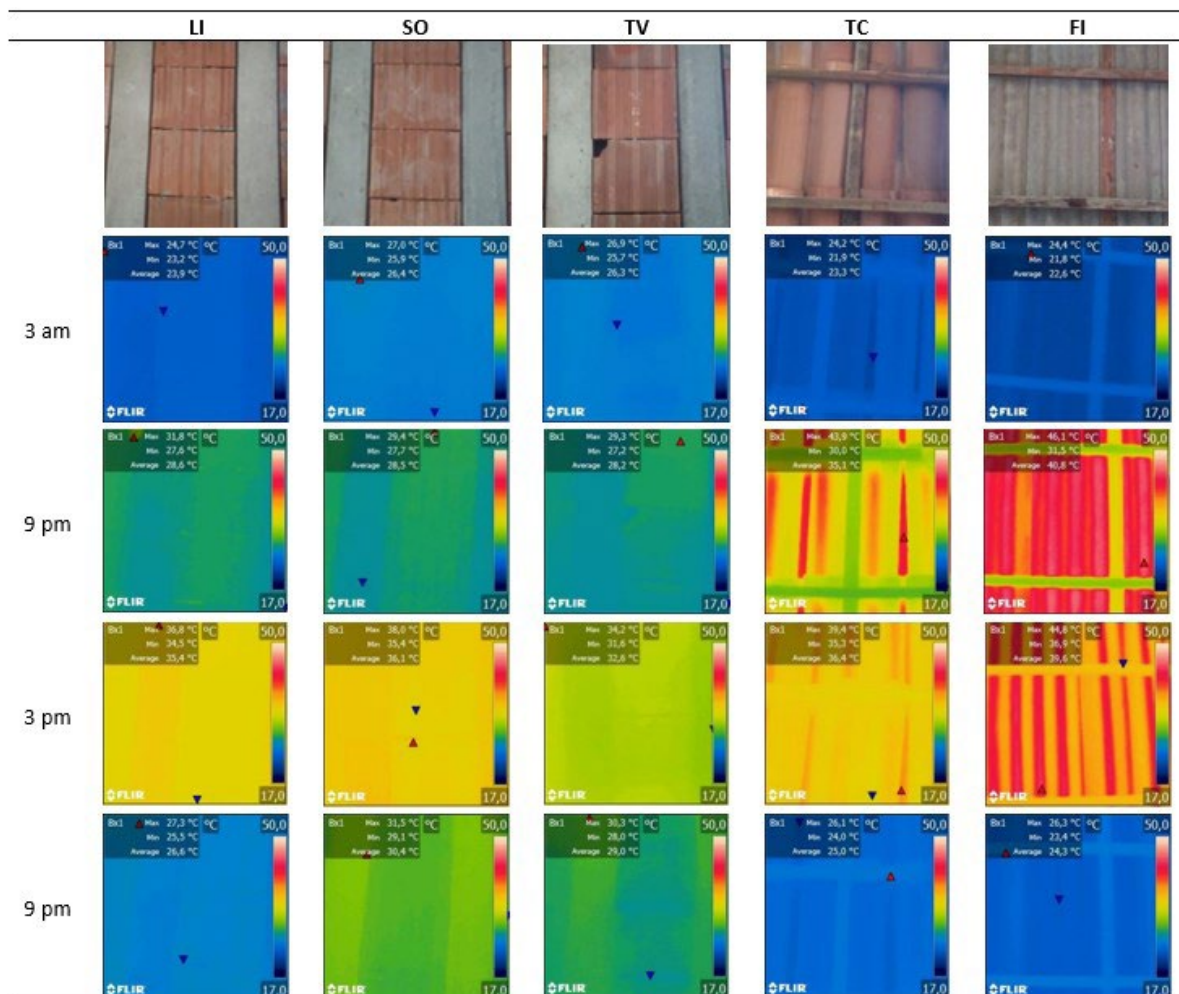


FIGURA 9 – Imágenes termográficas internas de los techos a las 3 am, 9 am, 3 pm y 9 pm del 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.

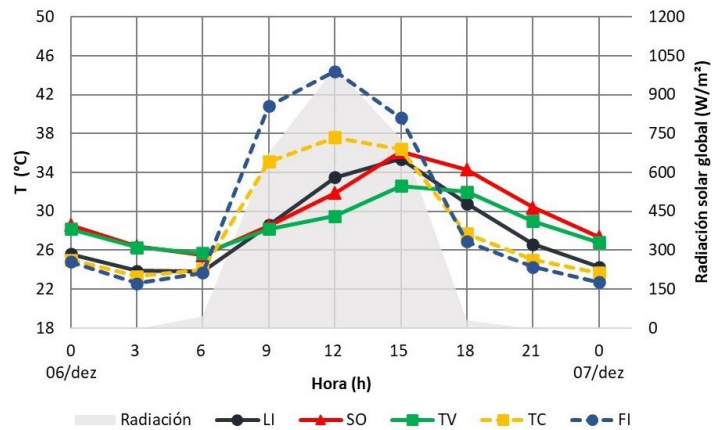


FIGURA 10 – Comportamiento de $T_{s.in}$ en los techos el 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.

La inercia térmica favorecida por la capa de suelo o sustrato se evidenció durante el amanecer cuando los sistemas con suelo expuesto (SO) y el techo verde (TV) mostraron diferencias en la temperatura superficial interna entre 2.6 °C a 3.8 °C, en comparación con otros techos. Esta diferencia disminuyó hasta las 6 am, mostrando la pérdida de calor más lenta de los dos techos.

Durante el día, con la incidencia de la radiación solar en la superficie externa de los techos, se observó un intenso calentamiento de los sistemas con tejas, principalmente por la baja inercia térmica y la alta transmitancia de los materiales, con énfasis en la teja fibrocemento (FI), cuya curva de calentamiento se elevó fuertemente poco después de las 6 am, seguido por las tejas cerámicas (TC). También se observó que el pico de la temperatura superficial interna, en ambos techos con tejas, se produjo al mediodía, coincidiendo con el momento de mayor incidencia de la radiación solar. Las tejas fibrocemento (FI) registró un máximo de 44.4 °C, con una diferencia térmica positiva de 6.8 °C en relación a las tejas cerámicas (TC) (37.7 °C). A los demás techos, la diferencia en la temperatura de la superficie interna alcanzó los 14.9 °C, en comparación al techo verde (TV) (29.5 °C), en la misma hora.

El mayor calentamiento de la temperatura superficial en los otros techos se observó en el registro a las 3 pm, con un retardo térmico proporcionado por la masa térmica en los techos con losa. Sin embargo, a pesar de la adición de la capa de suelo de 8 cm sobre la losa en el techo de suelo expuesto (SO), diferenciándolo de la losa impermeabilizada (LI), esto no influyó en la temperatura máxima interna, ya que la diferencia entre ambos estaba a solo 0.7 °C, con mayor calentamiento del techo con suelo expuesto (SO) a las 3 pm. Este resultado sugiere que el albedo de la superficie exterior del techo tiene una mayor influencia en la temperatura de la superficie interior que el aumento de masa térmica que se obtiene al agregar el sustrato a la losa.

Entre los techos con suelo expuesto (SO) y techo verde (TV), se observó una reducción de la temperatura superficial interna de 3.5 °C. Este resultado se refiere al tratamiento diferente en el techo verde, a partir de la sustitución de la capa de suelo por una capa de sustrato compuesta por suelo natural, arena y estiércol, además de la capa de vegetación y riego en la tarde previa al experimento.

Samayoa, Martínez y Nolasco (2015) encontraron una diferencia aún más significativa, con una reducción de 5.91 °C en la temperatura superficial interna con la adición de los elementos del techo verde sobre un techo de hormigón armado en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, México (clima cálido). Los autores atribuyen los resultados a la mayor densidad y alta conductividad del hormigón, lo que favorece la acumulación de calor.

Por la noche, se observó el efecto de la masa térmica sobre el comportamiento de la temperatura de la superficie interna. Los techos con tejas disipan rápidamente el calor al ambiente, debido a la masa térmica reducida, seguido de la losa impermeabilizada (LI). Sin embargo, los techos con suelo y sustrato (SO y TV) mantuvieron la temperatura de la superficie interna más caliente en comparación con los otros techos debido al calor acumulado en la capa de suelo a lo largo del día. También se observó que el comportamiento de la pérdida de calor después de la puesta del sol fue análogo en ambos techos (SO y TV), destacando que la vegetación sobre el sustrato tuvo poca influencia en la temperatura superficial interna durante la noche, con diferencia térmica 1.5 °C (9 pm) y 0,9 °C (12 am).

El comportamiento de la temperatura superficial interna mostró que el techo verde (TV) presentó menor variación diurna (6.9 °C), destacándose de los demás techos analizados. Este resultado se debe principalmente al reducido calentamiento de la superficie externa debido a los procesos físico-químicos de la vegetación durante el día y a la acumulación de calor favorecida por la capa de sustrato, cuya masa térmica proporcionó un mayor calentamiento superficial durante la noche. En contraste, la mayor variación diurna en la temperatura superficial interna se observó en la teja fibrocemento (FI) (21.8 °C), cuya alta transmitancia térmica combinada con el reducido espesor del material favoreció un mayor calentamiento durante el día, con respuesta térmica directa a la incidencia de la radiación solar en la superficie.

La Tabla [2] muestra los valores máximos, mínimos y la amplitud térmica registrados en las superficies internas de los techos analizados.

TABLA 2 – Valores máximos, mínimos y amplitud térmica de $T_{s.in}$ en los techos el 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.

$T_{s.in}$	Albedo		$T_{máx}$ (°C)	$T_{mín}$ (°C)	Amplitud térmica (°C)
LI	0.90	Dornelles (2015)	35.4	23.8	11.6
SO	0.20	Assis, Sirqueira y Bamberg (2013)	36.1	22.5	13.6
TV	0.25	Oke (1987)	32.6	25.7	6.9
TC	0.10 – 0.35	Oke (1987)	37.6	23.3	14.3
FI	0.52	Couto (2019)	44.4	22.6	21.8
$T_{a.ex}$	-		33.9	33.9	22.5

Temperaturas del aire interior

Los datos de temperatura del aire interior ($T_{a.in}$) se presentan en la [Figura 11], que muestra una fuerte influencia de la masa térmica en el comportamiento térmico del aire interior de las celdas de evaluación.

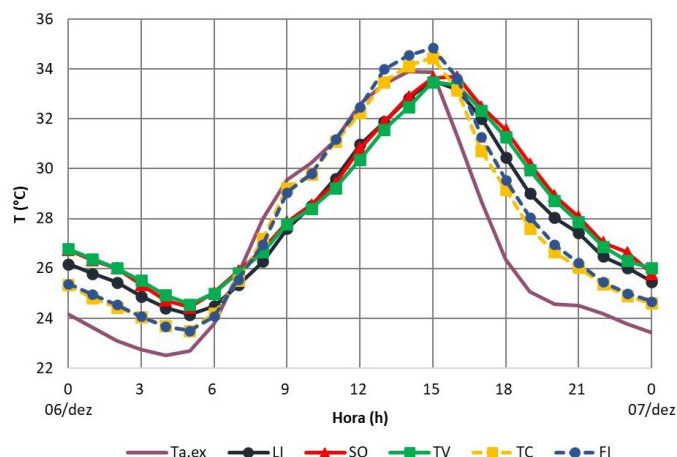


FIGURA 11 – Comportamiento de $T_{a.in}$ en los techos el 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.

Los techos con tejas (TC y FI) registraron valores similares con un comportamiento correspondiente a la temperatura del aire exterior, mostrándose menos favorables al control de las condiciones térmicas externas en el período cálido y seco, con bajo aislamiento térmico. Aunque las celdas de evaluación no tenían aberturas para intercambiar aire con el ambiente exterior, los techos con tejas superpuestas proporcionan pequeñas grietas en el techo que permiten el intercambio permanente de aire entre los ambientes interior y exterior. Por lo anterior, ambos sistemas mostraron el peor desempeño de amortiguamiento térmico, alcanzando temperaturas del aire ligeramente superiores dentro de las celdas de evaluación (0.2 °C y 0.6 °C en sistemas con teja cerámica (TC) y fibrocemento (FI), respectivamente) durante el tiempo de mayor calentamiento del aire exterior (2 pm).

Estos sistemas mostraron temperaturas del aire ligeramente por debajo de la temperatura del aire exterior entre las 7 am y las 12 pm. Mientras tanto, el mayor amortiguamiento térmico se observó a las 8 am, con diferencias térmicas inferiores a 1.0 °C (1.0 °C y 0.8 °C en techos con fibrocemento (FI) y teja cerámica (TC), respectivamente). A partir de la 1 pm, las temperaturas del aire registradas dentro de las celdas de evaluación con tejas fueron iguales o superiores a la temperatura del aire exterior.

Los techos con losas (LI, SO y TV) mostraron un mejor amortiguamiento térmico en comparación con los techos con tejas. Los techos con suelo y sustrato (SO y TV) mostraron resultados ligeramente superiores a los observados con la losa impermeabilizada (LI). Durante las horas de mayor calentamiento del aire exterior, los tres techos presentaron amortiguamiento térmico igual o superior a 1.0 °C, con énfasis en el techo verde (TV), cuya reducción de la temperatura del aire interior fue de 1.4 °C, a las 2 pm.

Estos techos también registraron temperaturas del aire dentro de las celdas de evaluación por debajo de la temperatura del aire exterior entre las 8 am y las 3 pm, con una reducción de temperatura superior a 1.0 °C, con un amortiguamiento térmico de 1.8 °C (12 pm), 2.0 °C (9 am), y 2.2 °C (12 pm), en techos con suelo expuesto (SO), losa impermeabilizada (LI) y techo verde (TV), respectivamente.

Las mayores diferencias térmicas positivas en la temperatura del aire exterior se observaron poco después de las 6 pm. Este resultado se debe a la ausencia de aberturas en las celdas de evaluación, lo que dificulta la pérdida de calor por convección, manteniendo el aire caliente en su interior. Las pequeñas grietas en los techos con tejas (TC y FI) facilitan el intercambio de calor con el ambiente exterior, resultando en un enfriamiento más marcado de la temperatura del aire interior en relación con los otros techos.

La Tabla [3] resume los datos registrados sobre el comportamiento de la temperatura del aire dentro de las celdas de evaluación.

	Ta.in (°C)		Amplitud Térmica (°C)	Amortiguamiento Térmico (°C)
	Máx.	Mín.		
LI	33.5	24.1	9.4	2.0
SO	33.7	24.4	9.3	1.8
TV	33.4	24.5	8.9	2.2
TC	34.4	23.5	10.9	0.8
FI	34.8	23.5	11.3	1.0
Ta.ex	33.9	22.5	11.4	-

TABLA 3 – Valores máximos y mínimos de Ta.in, amplitud térmica del aire, amortiguamiento y retardo térmico de Ta.in en los techos el 06/12/2018.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusión

Los resultados obtenidos mostraron diferencias relevantes en el desempeño térmico de los cinco techos en las tres variables analizadas en esta investigación: temperatura superficial externa e interna de los techos y temperatura del aire interno de las celdas de evaluación. Se observó que las características termodinámicas de los materiales utilizados fueron determinantes en el comportamiento térmico de los revestimientos. El albedo superficial tuvo una fuerte influencia en los resultados de la temperatura superficial externa, mientras que la masa térmica de los techos fue más significativa por los resultados de la temperatura superficial y el aire interior.

Se puede destacar que el techo verde (TV) mostró un mejor desempeño térmico entre los cinco techos en las tres variables analizadas, destacándose como una adecuada estrategia pasiva para mitigar las condiciones térmicas externas expresadas en la región semiárida, con características de clima cálido y seco. Los procesos físico-químicos de la vegetación irrigada combinados con la alta masa térmica de la cubierta – losa y capa de sustrato – favorecieron el desempeño térmico de este sistema de cubierta.

Finalmente, se destaca la necesidad de realizar investigaciones con un acercamiento al comportamiento térmico de este sistema de cubierta en climas semiárido, considerando otras variables, como espesor del sustrato, contenido de humedad del suelo y especies nativas resistentes a la intensa radiación solar en la región.

Agradecimientos

Los autores agradecen a CAPES y CNPq por su apoyo a través del otorgamiento de una beca de maestría; al Laboratorio de Fisiología y Parasitología Animal, tomando prestada la cámara termográfica; al Laboratorio de Agrometeorología (LAGROM), por la concesión de datos de radiación solar global; ambos de la Universidad Federal de Alagoas, *Campus* Arapiraca.

Referencias

ASSIS, E. S. de; SIRQUEIRA, C. A. de; BAMBERG, A. M. Influência da vegetação no microclima em ambiente simulado controlado. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 12.. ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONTRUÍDO. 8. 2013. Brasília. **Anais eletrônicos** [...] Brasília: 2013. CD-ROM.

CHAGOLLA-ARANDA, M. A.; SIMÁ, E.; XAMÁN, J.; ÁLVAREZ, G.; HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.; TÉLLEZ-VELÁZQUEZ, E. Effect of irrigation on the experimental thermal performance of a green roof in a semi-warm climate in Mexico. **Energy and Buildings**. v. 154. p. 232-243. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.082>.

COELHO, T. C. C. **Efeitos do envelhecimento natural no desempenho térmico de telhas onduladas de fibrocimento sem amianto**. 2017. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil. Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2017.

COMA, J.; PÉREZ, G.; SOLÉ, C.; CASTELL, A.; CABEZA, L. F. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable Energy**. v. 85. p. 1106–1115. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.074>.

COUTO, L. S. B. **ALTA II**: Uma alternativa aos métodos de medição de refletância solar para telhas cerâmicas e de fibrocimento. 2019. 167 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2019. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-12032020-143525/pt-br.php>>. Acesso em: 06 set. 2020.

DORNELLES, K. A. Refletância solar de tintas frias e convencionais para cobertura e os impactos da exposição ao intemperismo natural. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 13.; ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 9.. 2015. [Campinas]. **Anais eletrônicos [...]**. [Campinas]: PUC. 2015. CD-ROM.

FERNANDES, T. B.; RUIVO, R. B.; CUNHA, E. G. da; KREBS, L. F. Desempenho termoenergético de coberturas vegetadas em clima subtropical. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**. Campinas. SP. v. 9. n. 4. p. 262–275. 2018. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v9i4.8650882>.

FITCHETT, A.; GOVENDER, P.; VALLABH, P. An exploration of green roofs for indoor and exterior temperature regulation in the South African interior. **Environment, Development and Sustainability**. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00413-5>.

FLIR. FLIR i3. **FLIR i5. FLIR i7. Extech IRC30. Manual do utilizador**. 2010. Disponível em: <https://www.eletopecas.com/_uploads/ProdutoDownload/produto_6419.pdf>. Acesso em: 20 set. 2020.

GIVONI, B. Effectiveness of mass and night ventilation in lowering the indoor daytime temperatures. Part I: 1993 experimental periods. **Energy and Buildings**. v. 28. p. 25–32. 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(97\)00056-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(97)00056-X).

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?>>. Acesso em: 28 de ago. 2020.

KOTTERK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**. Berlim. v. 15. n. 3. p. 259–263. jul. 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

LIZ, D. G. S. de. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado extensivo para Florianópolis**. 2016. 113 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/172358?show=full>>. Acesso em: 10 set. 2020.

LOPES, D. A. R. **Análise do comportamento térmico de uma cobertura verde leve (CVL) e diferentes sistemas de cobertura**. 2007. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos. 2007. Disponível em: <<https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-11122007-093813/pt-br.php>>. Acesso em: 30 ago. 2020.

OKE, T.R. **Boundary Layer Climates**. 2. ed. New York: Cambridge University Press. 1987.

ONSET. **HOBO® Pro v2 (U23-00x) Manual**. Disponível em: <https://www.onsetcomp.com/files/manual_pdfs/10694-Q%20U23%20Manual.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2020a.

_____. **HOBO® Temp/RH 3.5% Data Logger (UX100-003) Manual**. Disponível em: <<https://www.onsetcomp.com/support/manuals/16209-f-ux100-003-manual>>. Acesso em: 30 ago. 2020b.

OSUNA-MOTTA, I.; HERRERA-CÁCERES, C.; LÓPEZ-BERNAL, O. Techo plantado como dispositivo de climatización pasiva en el trópico. **Revista de Arquitectura**. Bogotá. v. 19(1). p. 42-55. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.14718/RevArq.2017.19.1.1109>.

PARIZOTTO FILHO, S. Telhado vegetado. In: LAMBERTS, R. et. al. **Casa eficiente: bioclimatologia e desempenho térmico**. Florianópolis: UFSC/LabEEE. 2010. v. 1. p. 89-122. ISBN: 978-85-7426-098-3. Disponible en: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/livros/CasaEficiente_vol_I_WEB.pdf. Acceso en: 01 set. 2020.

PECK, S. W. et. al. **Greenbacks from green roofs: forcing a new industry in Canada**. Status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. Canadá: Canada Mortgage and Housing Corporation. 1999. Disponible en: <https://commons.bcit.ca/greenroof/files/2012/01/Greenbacks.pdf>. Acceso en: 05 set. 2020.

SAMAYOA, R. T.; MARTÍNEZ, Y. R.; NOLASCO, G. C. Desempeño térmico del techo verde, una alternativa viable para la edificación, em Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. **Revista Legado de Arquitectura y Diseño**. Toluca. México. n. 18. p. 103-113. jul.-dez. 2015. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=477947306007>. Acceso en: 06 set. 2020.

SANTOS, G. C. dos. **Desempenho térmico de telhados verdes no agreste pernambucano**. 2016. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru. 2016. Disponible en: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/25102>. Acceso en: 14 set. 2020.

SILVA, M. F. da. **Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local**. 2019. 185 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo: Dinâmicas do Espaço Habitado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2019. Disponible en: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/5791>. Acceso en: 30 ago. 2020.

SUDENE. Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste. **Delimitação do semiárido**. [S. I.]: ODNE. 2017. 1 mapa. color. Disponible en: <http://antigo.sudene.gov.br/images/arquivos/semiarido/arquivos/mapa-semiarido-1262municipios-Sudene.pdf>. Acceso en: 09 set. 2020.

_____. **Delimitação do semiárido**. Website. 2020. Disponível em: <http://antigo.sudene.gov.br/delimitacao-do-semiarido>. Acceso em: 09 set. 2020.

VECCHIA, F. Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental. In: ENCONTRO NACIONAL. 8.. ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. 4.. 2005. Maceió. **Anais eletrônicos** [...]. Maceió. 2005. Disponível em: http://www.infohab.org.br/encac/files/2005/ENCAC05_2146_2155.pdf. Acceso em: 14 set. 2020.

VEIGA, G. C. Imagens aéreas do canteiro experimental. **Arapiraca**: [s.n.]. 2018. fotografias color.

RESPONSABILIDADE INDIVIDUAL E DIREITOS AUTORAIS

A responsabilidade da correção normativa e gramatical do texto é de inteira responsabilidade do autor. As opiniões pessoais emitidas pelos autores dos artigos são de sua exclusiva responsabilidade, tendo cabido aos pareceristas julgar o mérito das temáticas abordadas. Todos os artigos possuem imagens cujos direitos de publicidade e veiculação estão sob responsabilidade de gerência do autor, salvo o direito de veiculação de imagens públicas com mais de 70 anos de divulgação, isentas de reivindicação de direitos de acordo com art. 44 da Lei do Direito Autoral/1998: “O prazo de proteção aos direitos patrimoniais sobre obras audiovisuais e fotográficas será de setenta anos, a contar de 1º de janeiro do ano subsequente ao de sua divulgação”.

O **CADERNOS PROARQ (ISSN 2675-0392)** é um periódico científico sem fins lucrativos que tem o objetivo de contribuir com a construção do conhecimento nas áreas de Arquitetura e Urbanismo e afins, constituindo-se uma fonte de pesquisa acadêmica. Por não serem vendidos e permanecerem disponíveis de forma **online** a todos os pesquisadores interessados, os artigos devem ser sempre referenciados adequadamente, de modo a não infringir com a Lei de Direitos Autorais.

Submetido em 25/12/2020

Aprovado em 24/03/2021