

Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR

Green roofs and white roofs thermal performance comparison using IR techniques

Eduardo Ernesto Ordóñez López*, María Milagrosa Pérez Sánchez*

RESUMEN

Se comparó el desempeño térmico de los sistemas de techo verde¹ y techo blanco² en un edificio construido con el sistema de vigueta pretensada de concreto y bovedilla (VB) con la hipótesis de que la degradación en efectividad de los techos blancos por el ambiente haría de los techos verdes una mejor alternativa para el ahorro de energía en edificios. También se validó la medición indirecta de temperatura a través de sensores infrarrojos para evitar la problemática derivada de los gradientes térmicos espaciales presentes en el sistema VB. Los resultados obtenidos muestran que el desempeño de los techos blancos se ve seriamente afectado por la degradación de su albedo³. Se observó que los techos verdes tienen una mejor capacidad para reducir las fluctuaciones temporales de temperatura y para favorecer las condiciones de confort térmico hacia el interior del edificio en comparación con los techos blancos.

ABSTRACT

This study evaluated the thermal performance of green roof and white roof systems in buildings with the honeycomb slab and self-supporting sheet in reinforced pre-stretched concrete roof system (HSSSRPC). Comparison based on the hypothesis that environmental related degradation in the performance of white roofs could lead to the green roofs been a better alternative for energy savings in buildings. In addition, indirect measurement of temperature through infrared sensors was also validated to avoid problems associated with the spatial thermal gradients present in the HSSSRPC system. Results show that the performance of white roofs is seriously affected by the degradation of its albedo. Observations show that green roofs have a better ability to reduce temporary fluctuations in temperature and to promote better conditions for thermal comfort into the building compared with white roofs.

INTRODUCCIÓN

En el estado de Yucatán predomina el clima Bs (seco o árido) y el Aw (cálido subhúmedo) de la clasificación de Köppen (Canto, 1997), por lo que la mayor parte del año se cuenta con condiciones de alta temperatura y alta humedad relativa. Por su latitud⁴, y debido a que las construcciones usualmente cuentan con techos casi planos, la ganancia de calor en los edificios se da a través del techo y los muros sur y poniente, lo cual lleva a invertir importantes cantidades de energía para el confort térmico de los usuarios.

Debido al interés en el ahorro de energía para mitigar los efectos adversos del quehacer humano sobre el medio ambiente, es cada vez más común el uso de sistemas de naturación de muros y azoteas (muros verdes y techos verdes) o la aplicación de materiales de impermeabilización con alta reflectividad (techos blancos).

Los techos blancos se presentan como una opción para aumentar el albedo de las ciudades que reduce el fenómeno de isla de calor (Araújo & Lourenço, 2005; Bretz & Akbari, 1997). Los techos verdes y los techos blancos logran

Recibido: 28 de abril de 2015
Aceptado: 21 de agosto de 2015

Palabras clave:

Ahorro de energía; confort térmico; techos verdes; techos blancos.

Keywords:

Energy saving; thermal comfort; green roofs; white roofs.

Cómo citar:

Ordóñez López, E. E., & Pérez Sánchez, M. M. (2015). Comparación del desempeño térmico de techos verdes y techos blancos mediante técnicas IR. *Acta Universitaria*, 25(5), 11-19. doi: 10.15174/au.2015.782

* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán. Av. de Ind. no Contaminantes, Periférico Norte s/n, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97203. Tel.: (999) 930-0550, ext.: 1053. Correos electrónicos: eduardo.ordonez@uady.mx; sperez@uady.mx

¹ El techo de un edificio que está protegido con un sistema de impermeabilización y que está parcialmente o completamente cubierto de vegetación creciendo sobre un sustrato adecuado.

² El techo de un edificio que ha sido preparado para reflejar una parte sustancial de la radiación solar con el objeto de reducir la transferencia de calor.

³ Razón de la radiación reflejada por una superficie en relación con la radiación incidente.

⁴ El estudio se realizó en la ciudad de Mérida, Yucatán, México, con coordenadas 20°58'N 89°37'O.

resultados bastante parecidos en la reducción de la ganancia de calor. Sin embargo, los mecanismos que emplean son muy distintos. Los techos blancos se basan en la alta reflectividad del material (albedo superior al 70%), mientras que los techos verdes (albedo del 20%) se basan en el sombreado y en la pérdida de calor latente a través de la evaporación y transpiración de las plantas y del sustrato (Gaffin, Rosenzweig, Eichenbaum-Pikser, Khanbilvardi & Susca, 2010; Wong, Chen, Ong & Sia, 2003).

Los sistemas de techo verde tienen algunas ventajas sobre los techos blancos, como son: mejoramiento del entorno visual, reducción de la escorrentía de agua de lluvia (Lang, 2010; Mentens, Raes & Hermy, 2006; Stovin, 2010), ampliación de las áreas verdes y del ecosistema urbano para beneficio de diversas especies (Bauman, 2006; Brenneisen, 2006; Kadas, 2006) y sensibilización hacia las prácticas ambientalmente amigables. Además, los techos verdes tienen ganancias de calor mucho menores que las que tienen los techos sin este sistema (+0.41 W/m² contra +2.57 W/m² en verano y -4.16 W/m² contra -6.5 W/m² en invierno⁵) (Gaffin *et al.*, 2010). Este comportamiento implica la reducción de los costos operativos relacionados con los conceptos de consumo energético para calefacción o para enfriamiento.

Aun cuando en el aspecto económico los techos blancos son más baratos y mejores para la reducción de la isla de calor en las ciudades que los techos verdes, éstos no deben ser descartados puesto que sobrepasan a los primeros por sus beneficios al ecosistema (Sproul, Wan, Mandel & Rosenfeld, 2014) y por su potencial para ayudar a reducir los efectos del cambio climático (Chan & Chow, 2013).

La caracterización experimental de los efectos de los techos verdes requiere que se instrumente un recinto con este sistema y se mida la radiación incidente, la velocidad del viento, la temperatura superficial en diferentes componentes estructurales, así como la temperatura y humedad relativa del aire tanto al exterior como al interior de la edificación (Celik, Morgan & Retzlaff, 2010; Gaffin *et al.*, 2010). En algunos casos también se analiza el comportamiento térmico del sustrato (Ouldboukhitine, Belarbi & Sailor, 2014; Teemusk & Mander, 2010). La medición de la temperatura superficial de la estructura del techo es uno de los parámetros importantes en la caracterización porque influye significativamente en el calor radiante dentro del

recinto y en el consumo energético. Usualmente este parámetro se mide por medio de termopares (Gaffin *et al.*, 2010; Ouldboukhitine *et al.*, 2014). La medición directa de este parámetro entabla retos importantes debido a la dificultad de establecer un buen contacto de los sensores con la superficie de los techos que en muchos casos es rugosa, además de que la medición usualmente se limita a pocos puntos.

En el estado de Yucatán, México, los techos frecuentemente se construyen con el sistema de vigueta pretensada y bovedilla. Este sistema constructivo se caracteriza por generar gradientes térmicos superficiales importantes. En la figura 1 se muestra una imagen térmica del interior de un edificio construido con este sistema tomada el 17 de abril de 2010, alrededor de las 16 h. En la parte superior de la figura 2 se muestran imágenes de la parte externa de un edificio construido con este sistema tomadas cerca de las 14 h. Las imágenes de la parte inferior de esta figura fueron tomadas en la misma fecha, pero después de las 20 h. Debido a esta situación, para obtener una buena estimación de la temperatura superficial interior del techo se debe promediar una gran cantidad de mediciones puntuales. En este trabajo se propone y prueba el uso de radiómetros en el infrarrojo (5000 nm a 14 000 nm) para la medición de este parámetro. Estos instrumentos integran la información de un área que depende del ángulo de vista del sensor y su distancia a la superficie del objeto. La medición de la temperatura superficial interior del techo también puede realizarse mediante cámaras termográficas (Kaplan, 2007). En ambos casos la medición correcta de este parámetro dependerá de la estimación adecuada de la emisividad de la superficie (Minkina & Dudzik, 2009).

OBJETIVOS

- Determinar si en las edificaciones elaboradas con base en el sistema constructivo de vigueta y bovedilla, el techo verde puede reducir los gradientes temporales y espaciales de temperatura en comparación con el techo blanco.
- Validar un método para la medición sin contacto de la temperatura superficial de estructuras con gradientes espaciales de temperatura.
- Comparar el desempeño de los techos verdes y blancos en términos de confort térmico al interior de las edificaciones en clima cálido sub-húmedo.

⁵ En el estudio de Gaffin, la tasa de flujo de calor está indicada de manera unitaria en Watts por cada metro cuadrado de superficie de techo.

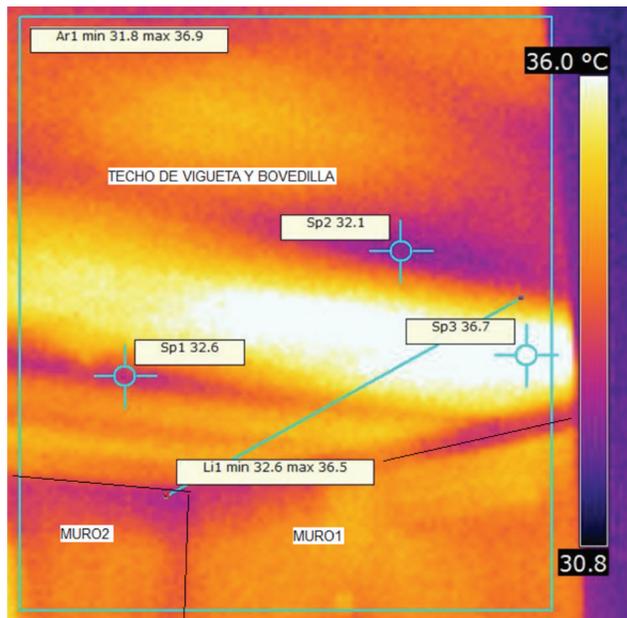


Figura 1. Gradientes espaciales en la temperatura en la superficie inferior de un techo construido con el sistema de vigueta y bovedilla en Mérida, Yucatán, México.
 Fuente: Elaboración propia.

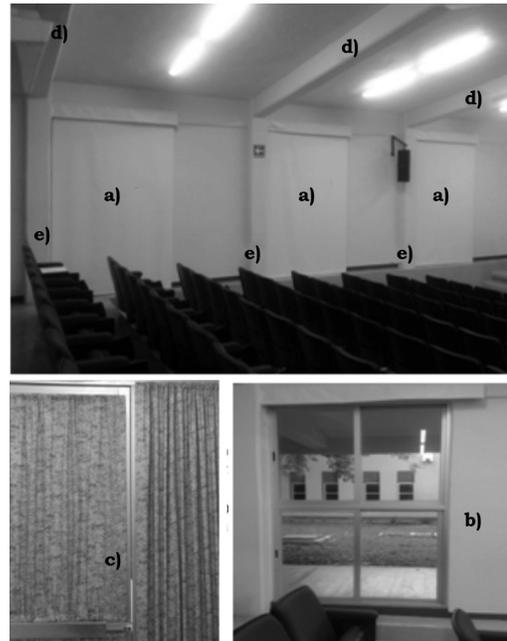


Figura 3. Descripción del edificio de las áreas de prueba y de referencia. a) Ventanas con la pantalla de loneta acrílica; b) ventana con la pantalla retraída; c) puerta de acceso; d) traves de concreto armado; e) columnas de concreto armado.
 Fuente: Elaboración propia.

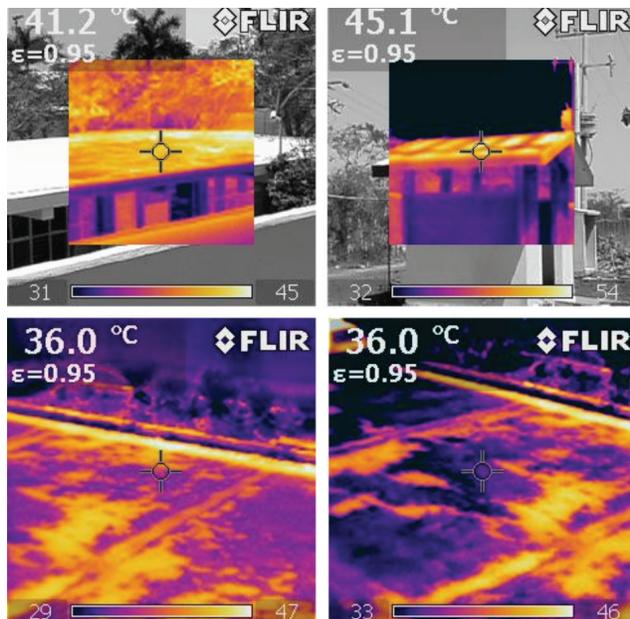


Figura 2. Gradientes espaciales de temperatura en la superficie exterior de techos construidos con el sistema de vigueta y bovedilla en Mérida, Yucatán, México.
 Fuente: Elaboración propia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se comparó el desempeño térmico en dos salas audiovisuales de similares dimensiones, una con techo verde (área de prueba) y otra con techo blanco (área de referencia).

El edificio en el que se sitúan estas áreas consta de una planta con techo de dos aguas, orientado con la fachada al sur. Tienen tres recintos, las salas audiovisuales y en medio de ellas un espacio para el almacenamiento y control de sus equipos.

La estructura está compuesta de traves y columnas de concreto armado y muros de *block* de concreto vibro prensado, de 0.15 m de espesor con acabado de mortero en ambas caras. La techumbre es de vigueta pretensada y bovedilla de 0.20 m de espesor con capa de concreto de 0.05 m y acabado de mortero e impermeabilizante en la parte superior; el plafón está constituido por mortero de aproximadamente 0.015 m de espesor. En las fachadas norte y sur cuenta con tres ventanas de 1.50 m × 2.37 m, en cada recinto, de

vidrio de 4 mm de espesor montados en estructura de aluminio. Cada ventana tiene una cortina interior de tipo pantalla de loneta acrílica (figura 3). Las salas audiovisuales cuentan con un acceso conformado por un cancel de aluminio de 1.50 m de ancho y una altura de 2.50 m con puerta de 1.06 m de ancho y un panel fijo de 0.44 m, ambos de vidrio de 4 mm. La puerta y el panel fijo cuentan con una cortina de tejido de punto de la marca Termatrol.

Área de referencia con techo blanco

Este espacio tiene ancho interno de 7.85 m, largo de 12.7 m. Cuenta con un techo a dos aguas cubierto con dos capas de impermeabilizante. La primera es de impermeabilizante asfáltico adherido a la estructura y la segunda es de impermeabilizante elastomérico blanco depositado sobre la primera capa. El techo sobresale de la estructura principal teniendo en planta unas dimensiones de 13.5 m de largo por 12.3 m de ancho. En la figura 4 se muestra el estado de este techo blanco posteriormente a la culminación del experimento. Es notable el deterioro de su albedo debido a los efectos del medio ambiente. Inicialmente el impermeabilizante presentaba una apariencia homogénea y clara. Al inicio del experimento se podaron las ramas de los árboles circundantes aun cuando en el periodo de mayor interés (en el verano) la sombra que proyectan sobre el edificio es mínima, ya que éste está alineado con el eje oriente-poniente.

Área de prueba de techo verde

Sala audiovisual 1 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY) tiene techo verde de tipo extensivo y continuo de 160 m² (figuras 5 y 6). Vista en planta, las dimensiones del área de prueba son iguales a las del área de referencia.

El sistema de techo verde está formado por una capa de impermeabilizante asfáltico, membrana anti-raíz de polietileno, membrana de drenaje, sustrato y vegetación. El sustrato tiene una profundidad de 7 cm, consiste en una mezcla de 20% de componentes orgánicos y 80% de componentes minerales y tiene un peso específico en seco de 250 kg/m³. El peso del techo verde en condiciones de saturación de agua y con las plantas plenamente desarrolladas varía en el rango de 80 kg/m² a 120 kg/m² (figura 7).



Figura 4. El techo del edificio de salas audiovisuales 1 (recinto con techo verde al fondo) y 2 (recinto con techo blanco al frente) de la FIUADY después de más de tres años del inicio del experimento. Es evidente el deterioro notable en el albedo del techo blanco causado por el medio ambiente. En el recuadro inferior se puede apreciar el contexto de ambas salas.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Cara norte del techo verde de 160 m² sobre la sala audiovisual 1 de la FIUADY.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Cara sur del techo verde de 160m² sobre la sala audiovisual 1 de la FIUADY.

Fuente: Elaboración propia.

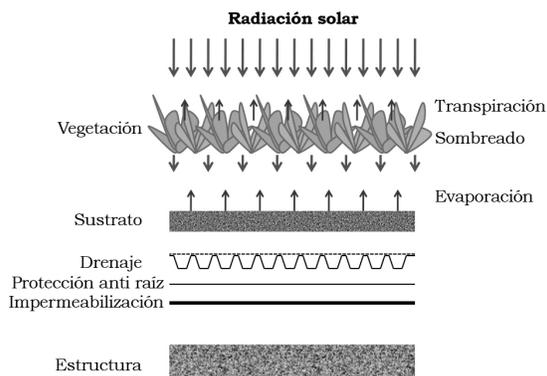


Figura 7. Componentes del techo verde.
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.
Características de los instrumentos de medición utilizados.

Parámetro	Humedad (%HR)	Temperatura ambiente (°C)	Temperatura superficial (°C)
Resolución	0.05	0.01	0.01 (25°C a 50°C)
Precisión	+/-3.0	+/-0.4	+/-0.5
Repetibilidad	+/-0.1		--
Tiempo de respuesta	8 seg (63%)	5 seg (63%)	5 seg (70%)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2.
Características de la cámara termográfica FLIR B 40i.

Parámetro	Valor
Resolución IR	120 px x 120 px
Sensibilidad térmica	< 0.1 °C @ 25 °C
Precisión	+2 °C o +2%
Rango de temperatura del objeto	-20 a +120 °C
Tiempo de respuesta	9 Hz
Campo de visión	25° x 25°
Corrección de emisividad	De 0.1 a 1.0
Corrección de temperatura reflejada	Automática y programable

Fuente: Elaboración propia.

Medición de parámetros ambientales

Las salas audiovisuales permanecieron completamente cerradas durante los periodos en los que se realizaron las mediciones. Los valores de la temperatura y humedad ambiental fueron tomados a 1.2 m sobre el nivel del suelo, tanto dentro del área de prueba como dentro del área de referencia. Sus valores fueron registrados

con intervalos de muestreo de 3 min. En la tabla 1 se indican las características de los instrumentos utilizados para la medición de humedad relativa, temperatura ambiente y temperatura superficial. Los datos de temperatura y humedad ambiental en los alrededores del edificio fueron tomados de la estación meteorológica de la FIUADY (intervalo de muestreo de 10 min).

El estudio abarca los años de 2012, 2013 y parte de 2014. Sin embargo, debido a que los recintos están activos (son dos salas audiovisuales aledañas de la Facultad de Ingeniería de la UADY) los datos válidos corresponden a los periodos en los que estas salas permanecen cerradas, esto es en fines de semana y en los periodos vacacionales de Semana Santa, verano y fin de año.

Medición de la emisividad de la superficie

Para la medición de la emisividad⁶ se utilizó el método indicado por Minkina & Dudzik (2009)⁷. El valor de emisividad obtenido para la superficie del techo fue de 0.84. Finalmente se cotejó la validez de este resultado verificando que tres lecturas fueran similares: la del sensor superficial de contacto, la de la cámara térmica enfocando un plástico con emisividad conocida adherido al techo (configurando el parámetro de emisividad de la cámara a 0.95) y la de la cámara térmica enfocando directamente la superficie del techo (configurando el parámetro de emisividad de la cámara a 0.84).

Medición de la temperatura superficial

Los registros de la temperatura superficial fueron obtenidos con sensores ópticos sensibles a la radiación electromagnética en el rango de 5000 nm - 14 000 nm. El sensor tiene un ángulo de visión de 60° y la temperatura indicada es el promedio de temperaturas en el área visible. Imágenes térmicas fueron tomadas periódicamente para validar el registro de datos de los sensores ópticos.

Medición infrarroja de los gradientes térmicos superficiales

La medición de estos gradientes se realizó utilizando una cámara termográfica FLIR B40i, cuyas características se indican en la tabla 2. El parámetro de emisividad se ajustó a 0.84.

⁶ Es la proporción de la radiación térmica emitida por una superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura.

⁷ Este método es útil para determinar la emisividad de un material que ya está instalado. Con un termómetro de contacto se mide la temperatura del objeto. La temperatura del material también se mide con una cámara termográfica. El valor de emisividad de la cámara se ajusta hasta que ambas lecturas correspondan. La superficie a ser caracterizada debe tener una temperatura homogénea. También configurar en la cámara el valor de humedad relativa y la distancia de ésta al objeto.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Gradiente térmico espacial en la estructura del techo

Con base en las imágenes térmicas tomadas a lo largo del experimento se puede concluir que el sistema de techo verde es más efectivo que el sistema de techo blanco en la reducción de los gradientes espaciales de temperatura en la superficie de la cubierta que da hacia el interior del recinto. En las figuras 8 y 9 (área con techo blanco) se muestran gradientes de temperatura superficial de 1.1 °C (a lo largo de la línea Li1 de la figura 8), 1.6 °C (dentro del rectángulo Ar1 de la figura 8), 2.4 °C (a lo largo de la línea Li1 de la figura 9) y 3.5 °C (dentro del rectángulo Ar1 de la figura 9), mientras que en las figuras 10 y 11 (área con techo verde) se muestran gradientes de temperatura superficial de 0.6 °C (a lo largo de la línea Li1 de la figura 10), 0.8 °C (dentro del rectángulo Ar1 de la figura 10) y 1.1 °C (a lo largo de la línea Li1 de la figura 11). Se eligen estas líneas y rectángulos para analizar áreas heterogéneas de temperatura que abarquen elementos estructurales de la cubierta pero que eviten las trabes, columnas y muros que también aparecen en las imágenes.

En las figuras 9 y 11 las superficies mostradas en las imágenes reciben la energía térmica que ha atravesado el techo y la radiación difusa del entorno. En el caso del techo blanco, las afectaciones en la impermeabilización reflejante se han traducido en la aparición de una zona caliente en la parte inferior del techo (figura 9).

Variaciones temporales de temperatura en la estructura del techo

Un ejemplo interesante para comparar el comportamiento dinámico del techo verde y el techo blanco lo tenemos en el periodo del 23 de marzo de 2013 al 2 de abril del mismo año. En este intervalo de tiempo tenemos dos días de alta radiación, seguidos de dos días de baja radiación y finalmente una serie de días de alta radiación. En la figura 12 se muestra que para días con alta irradiación (días 0, 1 y 4 al 10 en la figura 13) la temperatura en la superficie inferior del techo en el área de prueba (con techo verde) es menor que en el área de referencia (con techo blanco). También sucede lo mismo con la amplitud de la variación diaria de temperatura. Sin embargo, en días de baja radiación

(días 2 y 3 en la figura 13) la diferencia tiende a desaparecer y en el término de dos a tres días de baja radiación la temperatura es mayor en el área de pruebas, situación que se puede explicar por la mayor cantidad de masa térmica en el área con techo verde (ahí las fluctuaciones diarias dieron lugar a una caída de temperatura con pendiente casi constante mientras que en el techo blanco todavía se pueden apreciar las fluctuaciones diarias). También se puede observar que el techo verde es más efectivo que el techo blanco en la reducción de las fluctuaciones de temperatura en la estructura tanto en los días de alta como en los de baja radiación. En estudios posteriores se podría evaluar el efecto que esta reducción en las fluctuaciones térmicas pudiera tener en la extensión de la vida útil de la edificación.

Variación de las condiciones ambientales al interior de las áreas de prueba y de referencia

Aun cuando las fluctuaciones de la temperatura ambiente al interior de los recintos con techo blanco y verde se reducen sustancialmente en comparación con las fluctuaciones de la temperatura ambiente al exterior del edificio, el sistema de techo verde es el que logra mejores resultados en este sentido debido a la masa térmica que representan los componentes del sistema (figura 14). Una situación similar se puede observar en el caso de la humedad relativa (figura 15).

En las figuras 16 y 17 se muestran los datos de temperatura y humedad relativa al interior de los recintos en la carta psicrométrica del *American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), donde se indica en rojo la zona de confort probable y en amarillo la de confort seguro de Givoni. En ambas gráficas se marca en color gris el conjunto de datos de un solo día caluroso y con elevada humedad, y en color negro los datos para un periodo total de 10 días. En el caso del recinto con techo verde (figura 16) se observa que los datos están más cerca de la zona de confort. Vemos que el techo verde produce un conjunto de datos más homogéneo en temperatura y con valores más pequeños que en el caso del techo blanco. En el caso de la humedad relativa no se notan diferencias de importancia en el sentido de que en ambos casos se tienen valores elevados. Esto se debe a que las mediciones se realizaron con los recintos cerrados, por lo tanto, el techo verde no influye significativamente en la condición de humedad del recinto.

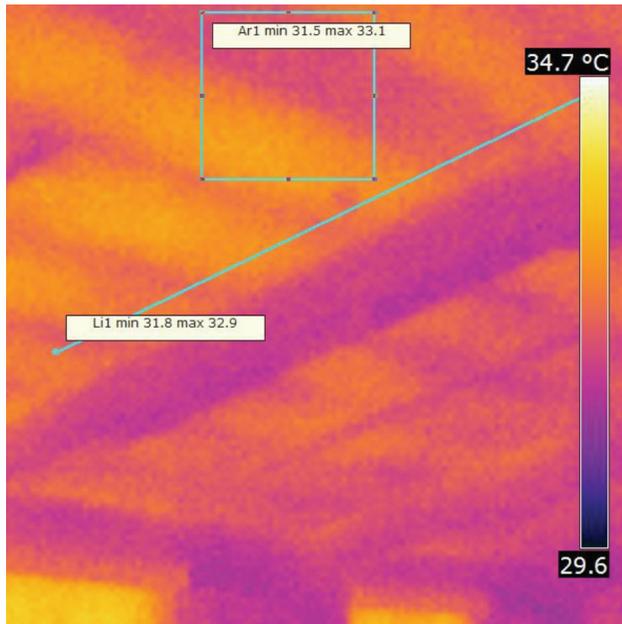


Figura 8. Imagen termográfica donde se muestra el gradiente de temperatura de 1.6 °C en la superficie inferior del techo en el interior del recinto en el área de referencia.
 Fuente: Elaboración propia.

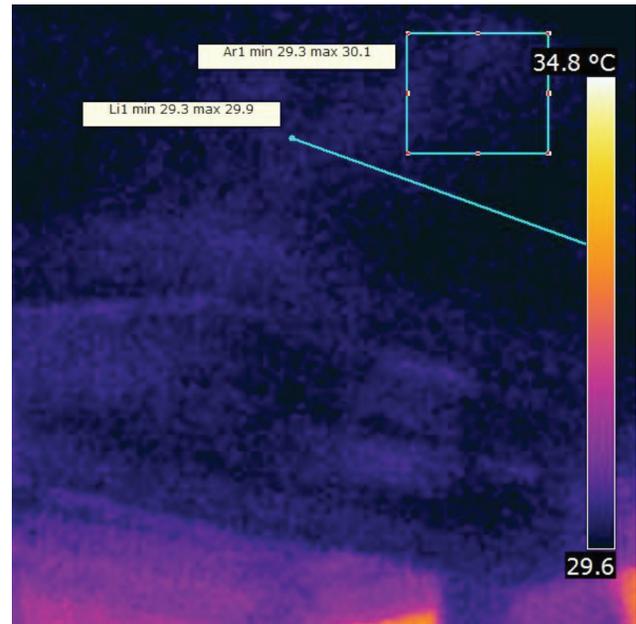


Figura 10. Imagen termográfica donde se muestra el gradiente de temperatura de 0.8 °C en la superficie inferior del techo en el área con techo verde.
 Fuente: Elaboración propia.

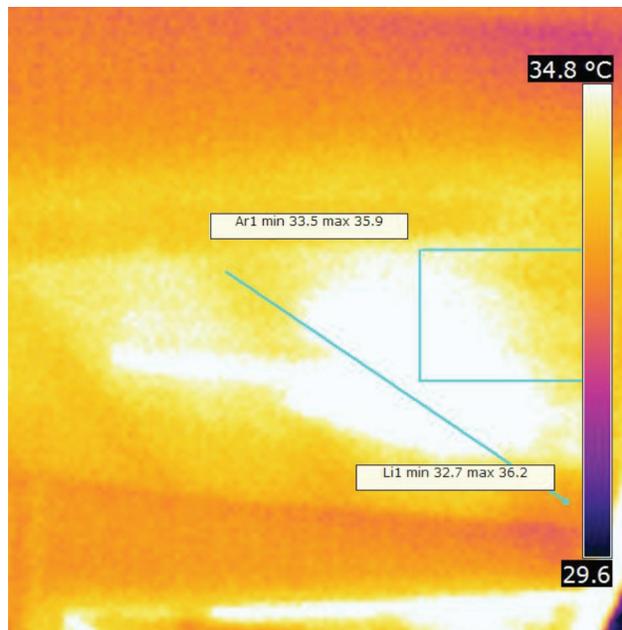


Figura 9. Imagen termográfica donde se muestra el gradiente de temperatura de 3.5 °C en la superficie inferior del techo en el pasillo exterior del área de referencia.
 Fuente: Elaboración propia.

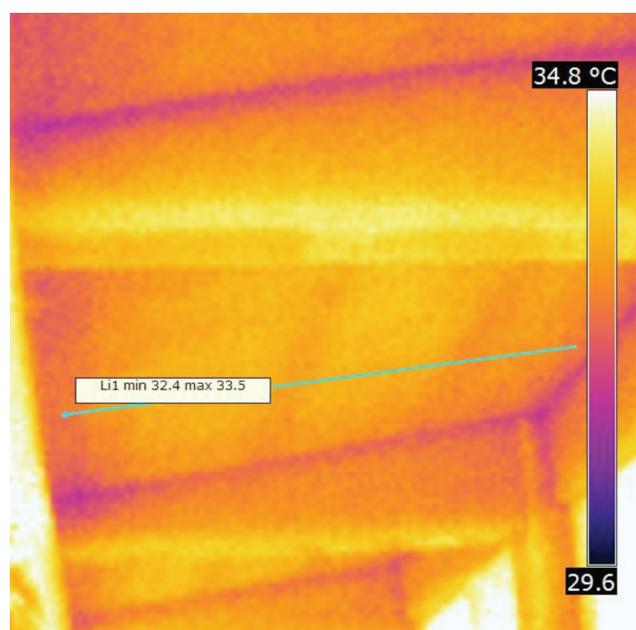


Figura 11. Imagen termográfica donde se muestra el gradiente de temperatura de 1.1 °C en la superficie inferior del techo en el pasillo exterior del área con techo verde.
 Fuente: Elaboración propia.

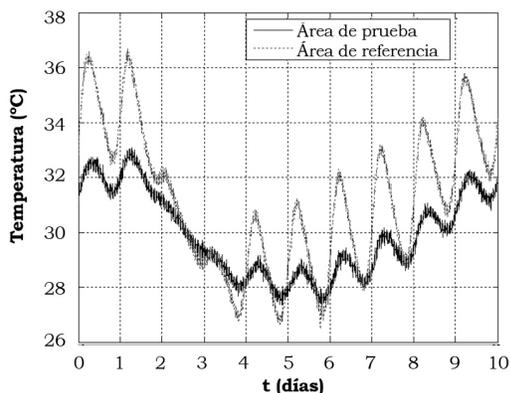


Figura 12. Temperatura de la superficie inferior del techo (interior del recinto) en las áreas bajo comparación en el periodo comprendido entre el 23 de marzo y el 2 de abril de 2013.
Fuente: Elaboración propia.

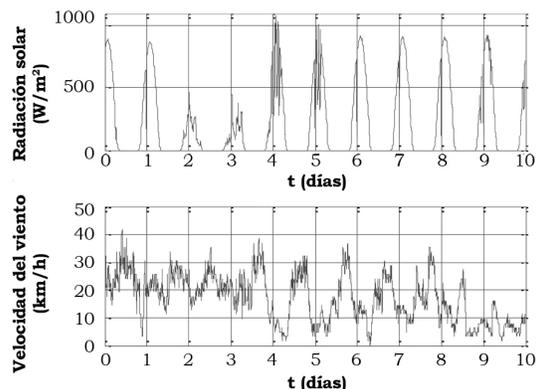


Figura 13. Radiación solar y velocidad del viento en las inmediaciones de las áreas bajo comparación en el periodo comprendido entre el 23 de marzo y el 2 de abril de 2013.
Fuente: Elaboración propia.

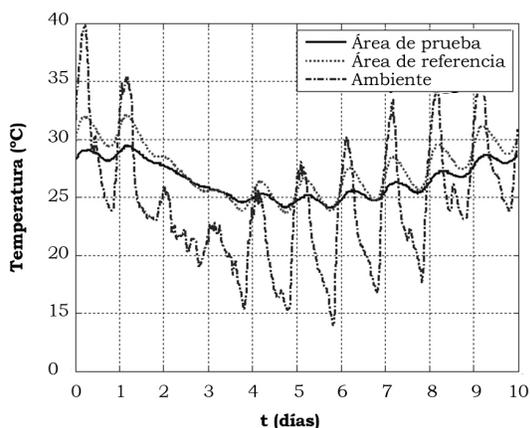


Figura 14. Variación de la temperatura ambiente en el interior y exterior del edificio.
Fuente: Elaboración propia.

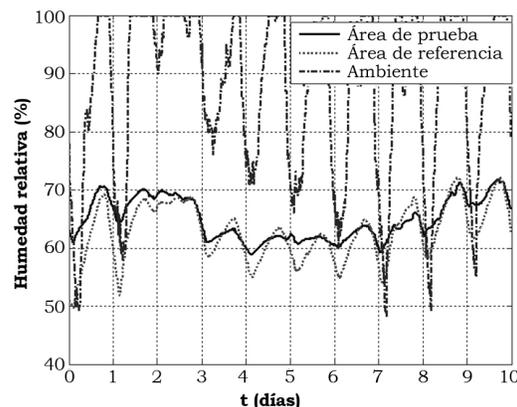


Figura 15. Variación de la humedad relativa en el interior y exterior del edificio.
Fuente: Elaboración propia.

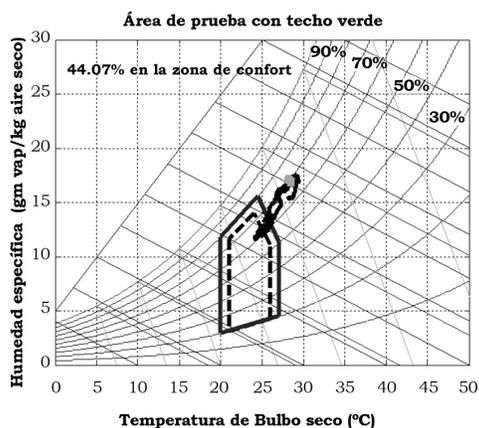


Figura 16. Carta psicrométrica para los valores de temperatura y humedad ambiental al interior del área con techo verde. En gris se resalta un día de alta radiación solar.
Fuente: Elaboración propia.

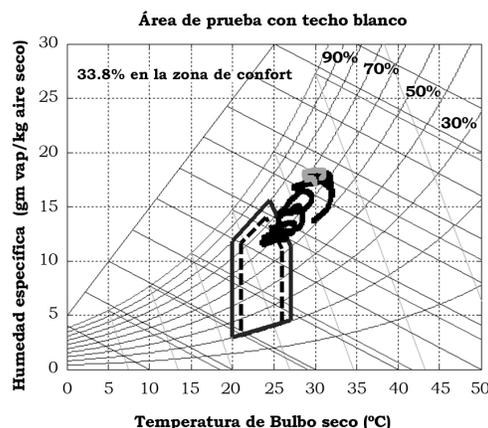


Figura 17. Carta psicrométrica para los valores de temperatura y humedad ambiental al interior del área con techo blanco. En gris se resalta un día de alta radiación solar.
Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En edificios similares construidos con el sistema de vigueta y bovedilla en el estado de Yucatán, México, un techo verde redujo los gradientes espaciales y temporales de temperatura de la cubierta en comparación con un techo blanco. La degradación natural en el techo blanco (disminución del albedo) fue notable al final del experimento y causó la aparición de gradientes espaciales de temperatura en la estructura del techo, en contraste el techo verde permaneció como un mecanismo efectivo en la reducción de los mismos. En sistemas que emplean vigueta y bovedilla la pérdida de desempeño reflectivo del techo blanco puede ser detectado fácilmente por medio de imágenes termográficas debido a la aparición de gradientes espaciales de temperatura en la superficie inferior del techo.

En este trabajo se verificó la utilidad de aplicar un método de medición sin contacto para registrar los valores de temperatura superficial en la cubierta de recintos con techo verde y techo blanco dada la necesidad de tener que medir una amplia superficie en áreas que presentan gradientes espaciales de temperatura y que permanecen activas durante la duración del experimento.

Las condiciones interiores de los locales representadas en la carta psicrométrica muestran que el techo verde presenta condiciones más homogéneas que el techo blanco, lo cual influye favorablemente en la temperatura de aire en el interior de los recintos.

Bajo las condiciones ambientales prevalecientes en el verano en Mérida, Yucatán, tanto en el caso del techo blanco como en el caso del techo verde, se requiere el uso de aparatos mecánicos de ventilación para lograr el confort térmico de los ocupantes de la edificación.

AGRADECIMIENTOS

Los datos de las variables ambientales fueron proporcionados por el I.C. Juan Ernesto Vázquez Montalvo, encargado de la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.

REFERENCIAS

- Araújo, R. T., & Lourenço, F. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295-300. doi: 10.1016/j.enbuild.2004.03.009
- Bauman, N. (2006). Ground-Nesting Birds on Green Roofs in Switzerland: Preliminary Observations. *Urban Habitats*, 4(1), 37-50.

- Bretz, S. E., & Akbari, H. (1997). Long-Term Performance of High-Albedo Roof Coatings. *Energy and Buildings*, 25(2), 159-167. doi: 10.1016/S0378-7788(96)01005-5
- Brenneisen, S. (2006). Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland. *Urban Habitats*, 4(1), 27-36.
- Canto Cetina, R. (1997). *Arquitectura bioclimática para Yucatán: principios generales y asoleamiento* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.
- Celik, S., Morgan, S., & Retzlaff, W. A. (July, 2010). *Evaluation of Energy Savings for Buildings with Green Roofs Having Different Vegetation*. International High Performance Buildings Conference, Indiana, USA. Paper 24.
- Chan, A. L. S., & Chow, T. T. (2013). Energy and economic performance of green roof system under future climatic conditions in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 64, 182-198. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.05.015
- Kadas, G. (2006). Rare Invertebrates Colonizing Green Roofs in London. *Urban Habitats*, 4(1), 66-86.
- Kaplan, H. (2007). *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment* (Third ed.). Bellingham, Washington USA: SPIE Press.
- Gaffin, S. R., Rosenzweig, C., Eichenbaum-Pikser, J., Khanbilvardi, R., & Susca, T. (2010). *A temperature and seasonal energy analysis of green, white, and black roofs*. Center for Climate Systems Research, Columbia University, New York, Technical Report.
- Lang, S. B. (2010). *Green Roofs As An Urban Stormwater Best Management Practice For Water Quantity And Quality in Florida And Virginia*, (PhD Dissertation) University of Florida, USA.
- 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.
- Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). *Infrared Thermography. Errors and Uncertainties*. Chippenham, Wiltshire, Great Britain: Wiley & Sons.
- Ouldoukhitine, S., Belarbi, R., & Sailor, D. (2014). Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, 114, 273-282. doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.073
- Sproul, J., Wan, M., Mandel, B., & Rosenfeld, A. (2014). Economic comparison of white, green and black flat roofs in the United States. *Energy and Buildings*, 71, 20-27. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.11.058
- Stovin, V. (2010). The potential of green roofs to manage urban Stormwater. *Water and Environment Journal*, 24(3), 192-199.
- Teemusk, A., & Mander, U. (2010). Temperature Regime of Planted Roofs Compared with Conventional Roofing Systems. *Ecological Engineering*, 36(1), 91-95.
- Wong, N. H., Chen, Y., Ong, C. L., & Sia, A. (2003). Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(2), 261-270.