

Confort térmico de techos verdes con *Cissus verticillata* (Vitaceae) en viviendas rurales tropicales*

Thermal comfort of green roofs with *Cissus verticillata* (Vitaceae) in tropical rural dwellings

Abraham Beltrán-Melgarejo¹, Mónica de la C. Vargas-Mendoza^{1§}, Arturo Pérez-Vázquez¹ y J. Cruz García-Albarado¹

¹LPI-4 Agronegocios, Agroecoturismo y Arquitectura del Paisaje, Colegio de Postgraduados Campus Veracruz, km 88.5, carretera Federal Xalapa-Veracruz. Municipio Manlio F. Altamirano, Veracruz. C. P. 91700. Tel: 52 (229) 2010770. Ext. 64333. (beltran.abraham@colpos.mx; parturo@colpos.mx; jcruz@colpos.com). [§]Autora de correspondencia: mvargas@colpos.mx.

Resumen

Los techos verdes han tomado auge debido a los múltiples beneficios que brindan, entre ellos la mitigación térmica de los edificios, y la mejora del confort térmico (CT). Aunque es una tecnología deseable en zonas cálidas y tropicales, se requiere aligerar su diseño convencional, a fin de adaptarlos a la vivienda rural tropical. La investigación se realizó en Veracruz, México, para evaluar el CT brindado por un prototipo de techo verde basado en el uso de pérgolas y de la enredadera *Cissus verticillata* (Vitaceae). Se comparó la temperatura bajo la lámina del techo de habitaciones de viviendas rurales con y sin techo verde. El CT de las habitaciones fue medido por el voto subjetivo (VS), el voto medio predicho (VMP), y la proporción de personas a disgusto (PPD), obtenidos de un grupo de evaluadores residente y otro visitante, quienes también calificaron su grado de aceptación de esta tecnología. La temperatura promedio bajo la lámina de las habitaciones con techo verde fue hasta 4.5 °C menor ($p < 0.05$) que en las habitaciones sin techo verde. El VS, VMP, y la PPD fueron mayores ($p < 0.01$, $p < 0.01$, y $p < 0.0001$, respectivamente) en las habitaciones sin techo verde, indicando un menor CT en éstas. La aceptación del grupo visitante fue significativamente mayor que la del residente ($p < 0.0001$). Se concluye que mediante el uso de techos verdes como el propuesto se alcanza un mayor CT en las viviendas rurales tropicales.

Abstract

Green roofs have taken rise because of the several benefits they provide, including thermal mitigation of buildings, and improving thermal comfort (TC). Although it is a desirable technology in warm, tropical areas, is required to lighten its conventional design, in order to adapt it to the tropical rural dwellings. This research was conducted in Veracruz, Mexico, for evaluating the TC provided by a prototype green roof based on the use of pergolas and Creeper *Cissus verticillata* (Vitaceae). The temperature under the roof sheet of rural households with and without green roof was compared. The TC of the rooms was measured using subjective vote (SV), the average predicted vote (APV), and the proportion of people uncomfortable (PPU), obtained from a group of evaluators resident and another visitor, who also rated their degree acceptance of this technology. The average temperature in the room with green roof was up to 4.5 °C lower ($p < 0.05$) than in rooms without green roof. The SV, APV, and PPU were higher ($p < 0.01$, $p < 0.01$ and $p < 0.0001$, respectively) in rooms without green roof, indicating a lower TC therein. Acceptance of the visiting group was significantly higher than that of the resident ($p < 0.0001$). It is concluded that by using green roofs as proposed is reached greater TC in tropical rural homes.

* Recibido: enero de 2014
Aceptado: julio de 2014

Palabras clave: *Cissus verticillata*, proporción de personas a disgusto, voto subjetivo, voto medio predicho.

Keywords: *Cissus verticillata*, average predicted vote, proportion of people uncomfortable, subjective vote.

Introducción

Los techos verdes son una alternativa arquitectónica cada vez más utilizada en el mundo por sus múltiples beneficios. Éstos van desde la preservación de la biodiversidad, la mitigación del efecto isla de calor y de la contaminación del aire en las áreas urbanas, al aislamiento térmico de las viviendas que reduce su carga calórica y consumo energético (Berardi *et al.*, 2014). Este último beneficio toma gran importancia en las zonas cálidas tropicales, donde la insolación diaria es alta la mayor parte del año (Hodo-Abalo *et al.*, 2012).

Un techo verde es una estructura colocada sobre una superficie plana o inclinada, diseñada para soportar vegetación sobre un edificio. Típicamente se compone de: 1) una capa externa de vegetación; 2) una capa de sustrato para el sostén y nutrición de las plantas; 3) membrana filtradora; 4) capa de drenaje; y 5) membrana anti-raíz, que es la capa en contacto con la losa del edificio (Oberndorfer *et al.*, 2007). El enfriamiento pasivo que proveen los techos verdes se induce principalmente por la acción de la capa de vegetación (Berardi *et al.*, 2014); ésta capta la mayor parte de la radiación solar (Del Barrio, 1998; Wong *et al.*, 2003) y minimiza las fluctuaciones de calor (Liu y Baskaran, 2003).

Del total de radiación solar que llega a la capa vegetal, aproximadamente 27% se refleja, 60% es absorbido por las plantas y el sustrato, y solo 13% se transmite y es absorbida por el techo del edificio (Ekaterini y Dimitris, 1998; Tabares-Velasco y Srebric, 2009). Se ha determinado que con la implementación de los techos verdes existe una disminución de la temperatura interna de las viviendas de hasta 7.5 °C (Qin *et al.*, 2012), aunque su efectividad depende del contenido de humedad de sus capas vegetativa y de sustrato (Zinzi y Agnoli, 2012), y del índice de área foliar de la capa vegetativa (Hodo-Abalo *et al.*, 2012).

Uno de los objetivos de la disminución de temperatura por medio de los techos verdes es brindar un mayor confort térmico a las personas. Éste es definido como aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico (ISO 7730, 1995). De acuerdo con Kvisgaard (1997) el confort es usualmente medido por el voto de

Introduction

Green roofs are an architectural alternative increasingly used throughout the world for its many benefits. They range from the preservation of biodiversity, mitigation of heat island effect and air pollution in urban areas, the thermal insulation of the houses that reduce caloric load and energy consumption (Berardi *et al.*, 2014). The latter benefit takes higher importance in warm tropical areas, where the daily insolation is high most of the year (Hodo-Abalo *et al.*, 2012).

A green roof is a structure placed on a flat or inclined surface, designed to support vegetation on a building. Typically it consists of: 1) an outer layer of vegetation; 2) a substrate layer for the support and plant nutrition; 3) a filtering membrane; 4) drainage layer; and 5) anti-root membrane, which is the layer in contact with the slab of the building (Oberndorfer *et al.* 2007). Passive cooling providing green roofs are mainly induced by the action of vegetation cover (Berardi *et al.*, 2014.) it captures the most sunlight (Del Barrio, 1998; Wong *et al.*, 2003) and minimizes heat fluctuations (Liu and Baskaran, 2003).

Of the total solar radiation reaching the topsoil, about 27% is reflected, 60% absorbed by plants and substrate, and only 13% is transmitted and absorbed by the roof of the building (Ekaterini and Dimitris, 1998; Tabares-Velasco and Srebric, 2009). It has been determined that with the implementation of green roofs there is a decrease in the internal temperature of the housing up to 7.5 °C (Qin *et al.*, 2012), although their effectiveness depends on the moisture content of the vegetative layer and substrate (Zinzi and Agnoli, 2012), and leaf area index of the vegetative layer (Hodo-Abalo *et al.*, 2012).

One of the objectives of the decrease of temperature by means of green roofs is to provide better thermal comfort to people. This is defined as that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment (ISO 7730, 1995). According to Kvisgaard (1997) comfort is usually measured by vote or subjective comfort votes (SV), the average predicted vote (PMV) and the percentage of people at ease (PPU). In the SV people rate their satisfaction

confort o voto subjetivo (VS), el voto medio predicho (VMP) y el porcentaje de personas a disgusto (PPD). En el VS las personas califican su satisfacción con la temperatura ambiente mediante una escala de sensación térmica de siete puntos, donde los extremos positivo y negativo son caliente y frío, respectivamente, y el cero representa una sensación térmica neutra satisfactoria; típicamente se evalúa en cámaras con control de temperatura, velocidad del viento y humedad relativa. El VMP es un índice objetivo del confort térmico que toma en cuenta factores ambientales y fisiológicos humanos, y predice el valor medio de la sensación humana. En su cálculo intervienen seis variables: la tasa metabólica, el aislamiento de la ropa, la temperatura radiante, así como la temperatura, velocidad de aire y humedad del aire (ANSI/ASHRAE, 2004). Del VMP se desprende el PPD, refiriéndose a la cantidad de personas a disgusto con la temperatura del sitio.

La mayoría de los estudios sobre techos verdes y sus beneficios se han centrado en zonas urbanas de climas templados. No obstante, el aumento de temperatura y pérdida del confort térmico no se restringe a las zonas urbanas, también las zonas rurales presentan problemas de elevación de temperatura dentro de las casas, debido a que los patrones y procesos de calentamiento global están influyendo en las tendencias actuales de temperaturas (Currit y Easterling, 2009). Además, los árboles y arbustos en los solares familiares que protegen las casas de la radiación solar se están perdiendo (Mas *et al.*, 2004), y el tipo de construcción ha pasado de ser casas con techos altos de materiales ligeros y frescos (hojas de palma, lámina de cartón, teja), a techos de poca altura con materiales que absorben el calor (lámina de zinc y concreto), por lo que la implementación de techos verdes puede ser una medida de mitigación calórica. Sin embargo, la pesada estructura de los techos verdes convencionales (Köhler, 2003) los hace difícilmente compatibles con las características de la vivienda rural tropical; es necesario modificar el diseño convencional de los techos verdes a fin de adecuarlos a este tipo de vivienda, y evaluar el desempeño de la nueva propuesta. Por ello, el presente trabajo tuvo como objetivos: 1) proponer un prototipo de techo verde ligero; y 2) evaluar, en condiciones de campo, el confort térmico brindado, bajo la hipótesis de que esta estructura, al reducir la carga calórica sobre el techo de las viviendas, mejora el confort térmico.

with the ambient temperature by a thermal sensation scale of seven points, where the positive and negative ends are hot and cold, respectively, and zero represents a satisfying sensation of thermal neutrality; typically evaluated in controlled temperature chambers, wind speed and relative humidity. The APV is an objective thermal comfort index that takes into account environmental and physiological human factors, and predicts the mean value of human feeling. In their calculation, six variables are involved: metabolic rate, clothing insulation, radiant temperature and the temperature, air speed and humidity (ANSI/ASHRAE 2004). The APV PPU follows, referring to the number of people unhappy with the temperature of the site.

Most studies on green roofs and their benefits have focused on urban areas in temperate climates. However, the increase in temperature and loss of thermal comfort is not restricted to urban areas; rural areas also present problems of temperature rise inside the houses, because the patterns and processes of global warming trends are influencing current temperature (Currit and Easterling, 2009). In addition, trees and shrubs in family plots that protect houses from solar radiation are missing (Mas *et al.*, 2004), and the type of construction has gone from homes with high ceilings light and fresh material (leaves palm, cardboard sheet, tile), a low-rise roofs with materials that absorb heat (zinc sheet and concrete), so that the implementation of green roofs can be a measure of heat mitigation. However, the heavy structure of conventional green roofs (Köhler, 2003) makes them difficult to reconcile with the characteristics of tropical rural housing; is necessary to modify the conventional design of green roofs in order to adapt to this type of housing, and evaluate the performance of the new proposal. Therefore, this study aimed to: 1) propose a prototype lightweight green roof; and 2) to evaluate, under field conditions, the thermal comfort provided under the assumption that this structure, to reduce the heat load on the roof of homes, improving thermal comfort.

Materials and methods

The research was conducted from April to September 2011 in the community of Angostillo, Paso de Ovejas, Veracruz, Mexico. The climate of the site, according to the Köppen

Materiales y métodos

La investigación se realizó de abril a septiembre de 2011 en la comunidad de Angostillo, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México. El clima del sitio, según la clasificación de Köppen modificada por García (1973), es del tipo $Aw_0''(w)(i')g$, que es el más seco de los cálidos subhúmedos, con lluvias en verano, temperatura media anual de 25 °C y precipitación estacional, con una media anual no mayor a 1 000 mm.

Se seleccionaron tres casas semejantes de acuerdo con las siguientes características: 1) techos de lámina zinc; 2) con orientación de este a oeste; 3) cercanas entre ellas; 4) que dispusieran de dos habitaciones separadas pero de dimensiones y orientación semejantes; 5) cuyos propietarios estuvieran de acuerdo en modificar sus casas; y 6) que las personas se comprometieran colaborar con el cuidado de las plantas. Las características específicas de las casas y habitaciones se describen en el Cuadro 1. En cada casa se seleccionó al azar una habitación y sobre ésta se construyó el prototipo de techo verde.

classification modified by García (1973), $Aw_0''(w)(i')g$, which is the driest of the warm humid climates with summer rainfall, mean annual temperature 25 °C and seasonal precipitation, with no more than 1 000 mm annual average.

Three similar houses in accordance with the following characteristics were selected: 1) zinc tin roofs; 2) oriented east-west; 3) close to each other; 4) two separate rooms were available but similar dimensions and orientation; 5) whose owners would agree to modify their homes; and 6) that people commit to collaborate with plant care. The specific characteristics of the houses and rooms are described in Table 1 in each house was randomly selected a room and on this green roof prototype was built.

Whereas the topsoil is the main inducer of passive cooling provided by green roofs (Berardi *et al.*, 2014) and most of the weight is due to the other layers (Köhler, 2003), the proposed prototype differs from conventional green roofs that used: 1) a pergola for growing foliage plants; 2) Container substrate for the growth of the displaced to the sides of the housing estate; and 3) *Cissus verticillata* (L.)

Cuadro 1. Características de las habitaciones y techos verdes colocados en cada vivienda.
Table 1. Characteristics of the rooms and green roofs placed in each house.

	Casa 1	Casa 2	Casa 3
Tamaño de la habitación	4 * 4 m	3.85 * 2.15 m	3.60 * 4 m
Altura del techo	2.2 m	2.1 m	2.35 m
Núm. de macetas	8	7	8
Tipo de sostén de macetas	Dos repisas de bambú fijadas a la pared	Una repisa de bambú fijada a la pared	Dos repisas sostenidas en el suelo

Considerando que la capa vegetal es la principal inductora del enfriamiento pasivo provisto por los techos verdes (Berardi *et al.*, 2014) y que la mayor parte de su peso es debido a las otras capas (Köhler, 2003), el prototipo propuesto difiere de los techos verdes convencionales en que utilizó: 1) una pérgola para el crecimiento del follaje de las plantas; 2) contenedores de sustrato para el crecimiento de las raíces desplazados a los costados de la vivienda; y 3) la planta *Cissus verticillata* (L.) Nicolson & Jarvis (Vitaceae), especie enredadera nativa, que crece silvestre en la localidad -identificada por la Biol. Lorena P. Sánchez Morales, y los ejemplares herborizados depositados en el herbario del Instituto de Investigaciones Biológicas de la Universidad Veracruzana, Xalapa-.

Nicolson & Jarvis (Vitaceae), a native species vine plant that grows wild in the town-identified by Biol. Lorena P. Sánchez Morales, and herbarium specimens deposited in the herbarium of the Institute Biological Research of the University of Veracruz, Xalapa.

The pergola was constructed with lightweight PTR, and grid 0.15 * 0.15 m, 0.5 m above overlay sheet roof of the house (Figure 1). The plants used in green roofs were obtained from the propagation by cuttings of wild individuals of the town; the plants were placed in pots of 12 l, with 11 l of substrate mixture Floraska peat moss, soil and sand from the site (1: 1: 1); one plant per pot; arranged by external ledges on the sides of the house, at an average height to facilitate irrigation

La pérgola se construyó de PTR liviano y malla para colar de cuadrícula 0.15 * 0.15 m, superpuesta 0.5 m arriba de la lámina de techo de la casa (Figura 1). Las plantas utilizadas en los techos verdes se obtuvieron de la propagación por esquejes de individuos silvestres de la localidad; las plantas se colocaron en macetas de 12 l, con 11 l de sustrato, mezcla peat moss Floraska, tierra y arena del sitio (1:1:1); una planta por maceta; dispuestas mediante repisas externas en los costados de la casa, a una altura media para facilitar el riego y fertilización. A cada planta se le colocó un tutor de bambú de 1.1 m, a fin de conducir su crecimiento hacia la pérgola; se regó cada 2 d y se fertilizó con 50 ml de Triton (N 1%, P 1.9%, K 1%), cada 2 d durante el primer mes; posteriormente se aplicaron 20 g de urea por maceta, cada 7 d. Una vez que el follaje cubrió 100% de las pérgolas, se llevó el registro de la temperatura bajo el techo de cada habitación seleccionada, mediante un datalogger marca MC modelo USB-500, colocado a 0.15 m bajo la lámina.

Para evaluar el confort térmico se seleccionaron dos grupos de 10 personas. El grupo llamado “residente” se conformó por los habitantes de las casas y vecinos, de 28- 57 años de edad, seis mujeres y cuatro hombres, y la vestimenta ligera, para el caso de los hombres fue pantalón de vestir, camisa, calcetines y zapatos y para las mujeres, un vestido. El grupo llamado “visitante” se conformó con jóvenes de 20-25 años, cuatro mujeres y seis hombres. La vestimenta de este grupo consistió en pantalón de mezclilla azul claro, camiseta blanca de algodón, calcetas y zapatos de trabajo para ambos sexos. Las evaluaciones por los grupos visitante y residente, se realizaron de 15:00 - 18:00 h, el 20 y 26 de septiembre de 2011, respectivamente.

Cada persona participante visitó las seis habitaciones en estudio y en cada una de ellas calificó su grado de confort mediante un cuestionario. Las rutas de visita fueron planeadas anticipadamente de manera que no hubiera más de dos personas por habitación al mismo tiempo, y a cada persona participante se le asignó aleatoriamente una ruta distinta. Al entrar en cada habitación, las personas permanecieron sentadas durante 15 min, tras los cuales respondieron un cuestionario de 22 reactivos basado en diferenciales semánticos. El cuestionario se estructuró en tres secciones, las dos primeras (14 reactivos) fueron referentes al ambiente de la habitación y la sensación física de la misma, y la tercera (ocho reactivos) sobre la aceptación y percepción de los techos verdes.

and fertilization. Each plant was placed a bamboo tutor 1.1 m, in order to drive its growth towards the pergola; watered every 2 d and fertilized with 50 ml of Triton (N 1% P 1.9% K 1%) every 2 d during the first month; then 20 g of urea per pot were applied every 7 d. Once the foliage covered 100% of the pergolas, recording the temperature under the ceiling of each room was selected by a "datalogger" brand USB-500, placed 0.15 m below the MC sheet.

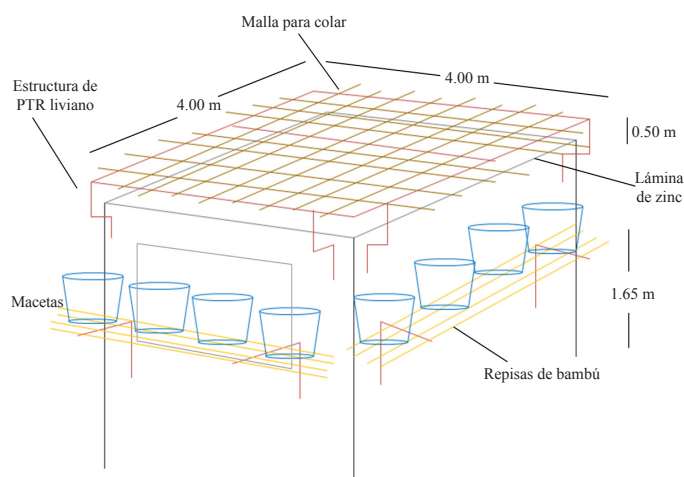


Figura 1. Diseño del techo verde.
Figure 1. Design of the green roof.

For evaluating the thermal comfort, two groups of 10 people were selected. The group called "resident" was formed by the inhabitants of the houses and neighbours of 28-57-year-old, six women and four men, and light clothing, in the case of men was dress pants, shirt, socks and shoes for women, a dress. The group called "visitor" settled for youth 20-25 years, four women and six men. The dress of this group consisted of light blue denim pants white cotton shirt, socks and shoes work for both sexes. Evaluations by visitors and resident groups were conducted from 15:00 - 18:00, on 20 and 26 September 2011 respectively.

Each participant visited the six person rooms studio and each of them rated their degree of comfort by questionnaire. The tour route were planned in advance so that there were more than two people per room at the same time, and each individual participant was randomly assigned a different route. As they enter each room, people remained seated for 15 min, after which they answered a questionnaire of 22 reagents based on semantic differentials. The questionnaire was divided into three sections, the first (14 reagents) were both related to the environment of the room and the physical sensation of it, and the third (eight reagents) on the acceptance and perception of green roofs.

En las dos primeras secciones del cuestionario, cada reactivo se calificó en una escala de 0 a 3, indicando apreciación de total confort o total no confort, respectivamente. Se obtuvo el promedio calificación de los 14 reactivos, el cual es un índice del confort térmico como fue percibido por cada persona, y corresponde al voto subjetivo (VS) observado en cada habitación.

A fin de obtener las variables necesarias para el cálculo del VMP, durante la estancia de cada persona, un termómetro marca Steren modelo TER-100 con dos sensores, registró simultáneamente la temperatura del aire (bulbo seco) y la temperatura de globo, introduciendo el sensor en una esfera elipsoide oscura de plástico, y obtener así la temperatura radiante; la humedad y la velocidad del viento fueron registradas con una estación meteorológica inalámbrica marca Davis, modelo Vantage Pro26152 y un anemómetro marca Smart sensor, modelo AR816; el termómetro, sus sensores, y la estación meteorológica se colocaron al centro de la habitación, sobre una estructura, a 1.20 m del suelo, considerando la altura de una persona sentada.

De acuerdo con la edad y sexo de las personas, se calculó la tasa metabólica y con respecto al tipo de ropa se determinó el aislamiento de la vestimenta por medio de las tablas establecidas por la American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (ANSI/ASHRAE, 2004). Con los datos antes mencionados, se calculó el voto medio predicho (VMP) y el porcentaje de personas a disgusto (PPD), utilizando el algoritmo de Nilsson y Håkan (2005) basado en la fórmula determinada por la ASHRAE. Se obtuvo el VMP y el PPD para cada grupo evaluador, y cada habitación evaluada.

La tercera sección del cuestionario evaluó la aceptación de los techos verdes; cada reactivo se calificó del 0 al 8, correspondientes a un completo rechazo o una completa aceptación, respectivamente. Se obtuvo un índice de aceptación por persona utilizando el promedio de sus respuestas en las tres casas.

Los promedios de temperatura bajo la lámina del techo de cada habitación, registrados durante la realización de las evaluaciones del confort térmico, se compararon mediante pruebas de *t* de una sola cola para muestras pareadas, a fin de determinar si la temperatura bajo la lámina fue menor en las habitaciones con techo verde que en aquellas sin techo verde; estas pruebas se realizaron en Microsoft Excel 2010.

In the first two sections of the questionnaire, each item was rated on a scale of 0-3, indicating appreciation of total comfort no comfort or full, respectively. The average rating of the 14 reagents, which is an index of thermal comfort as perceived by each person, and corresponds to the subjective Vote (SV) observed in each room was obtain.

In order to obtain the necessary variables to calculate the APV, during the stay of each person, a thermometer was used, brand Steren Model TER-100 with two sensors, recorded simultaneously air temperature (dry bulb) and the temperature of the globe, by entering the sensor in a dark plastic sphere ellipsoid, and get the radiant temperature; humidity and wind speed were recorded with a mark Davis wireless weather station, Vantage Pro26152 model and brand Smart sensor anemometer, Model AR816; thermometer, its sensors, and the weather station is placed at the centre of the room, on a structure, 1.20m above the ground, considering the height of a seated person.

According to the age and sex of individuals, the metabolic rate was calculated and compared to the type of clothing the clothing insulation was determined by means of the tables established by the American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. (ASHRAE) (ANSI/ASHRAE 2004). With the above data, the average predicted mean vote (PMV) and the percentage of people at ease (PPU) was calculated using the algorithm and Håkan Nilsson (2005) based on the formula determined by ASHRAE. The PMV and PPU was obtained for each group and evaluated each room.

The third section of the questionnaire assessed the acceptance of green roofs; each reagent was graded from 0 to 8, corresponding to a complete rejection or complete acceptance, respectively. An acceptance rate per person using the average of their responses on the three houses was obtained.

The average temperature in the ceiling of each room, recorded during the performance of thermal comfort assessments, were compared using *t* tests for single-tailed paired samples to determine if the temperature was less under the lamina in rooms with green roof green roof in those without; these tests were performed in Microsoft Excel 2010.

The SV were transformed to ranks by PROC RANK of SAS (SAS, 2010), and subjected to analysis of variance for split plot randomized block where the main plot was the house, the lower plot the type of roof, and the blocking factor person; the PROC MIXED of SAS (SAS, 2010) was used; each evaluator

Los VS fueron transformados a rangos mediante el PROC RANK de SAS (SAS, 2010), y sometidos a un análisis de varianza de parcelas divididas en bloques al azar, donde la parcela mayor fue la casa, la parcela menor el tipo de techo, y el factor de bloqueo la persona; se utilizó el PROC MIXED de SAS (SAS, 2010); cada grupo evaluador se analizó por separado. De esta manera se determinó si existieron diferencias significativas debidas a la casa, al tipo de techo o la interacción entre ambos.

Se obtuvo el promedio del VMP y PPD por tipo de techo y se determinó si fueron menores en las habitaciones con techo verde que en aquellas sin techo verde, mediante pruebas de t de una cola para muestras pareadas, utilizando Microsoft Excel 2010; en el caso del PPD, se utilizó la transformación arcoseno, recomendada para la comparación de porcentajes (Sokal y Rohlf, 1981).

Los índices de aceptación por persona fueron transformados a rangos mediante el PROC RANK de SAS (SAS, 2010), y sometidos a un análisis de varianza PROC GLM de SAS (SAS, 2010), para determinar diferencias significativas entre los grupos evaluadores.

Resultados y discusión

La temperatura media bajo la lámina del techo de las viviendas bajo estudio, observada durante las evaluaciones de confort térmico (20 y 26 de septiembre) fue significativamente menor en las habitaciones con techo verde, que en aquellas sin techo verde (Figura 2); esto es un indicador de que el prototipo de techo verde propuesto efectivamente mitigó la carga calórica de los techos de las habitaciones. Las reducciones en temperatura observadas (3.4 y 4.5 °C) son semejantes a las reportadas por Pandey *et al.* (2013) en techos verdes convencionales, si bien inferiores a lo obtenido por Liu y Baskaran (2003) y De Nardo *et al.* (2005), pero superiores a los resultados de Jaffal *et al.* (2012).

El VS promedio del grupo residente fue de 0.63 y 2.23, para las habitaciones con y sin techo verde, respectivamente, detectándose diferencias significativas debidas al tipo de techo y entre casas (Figura 3); el promedio del VS del grupo visitante fue de 0.94 y 2.44, para las habitaciones con y sin techo verde, respectivamente, siendo esta diferencia estadísticamente significativa (Figura 4). Es posible que, a diferencia del grupo visitante, el residente fue capaz de

group was analysed separately. Thus, we determined whether there were significant differences due to the house, the roof type or interaction between them.

APV and the average PPU was obtained by roof type and determined whether they were lower in rooms with green roof green roof in those without, using t tests for paired samples a queue, using Microsoft Excel 2010; in the case of PPU, that are recommended for comparison of percentages (Sokal and Rohlf, 1981) arcsine transformation was used.

Acceptance rates per person ranges were processed using the SAS PROC RANK (SAS, 2010), and subjected to analysis of variance PROC GLM of SAS (SAS, 2010) to determine significant differences between groups assessors.

Results and discussion

The average temperature on the roof of the houses under study, observed during assessments of thermal comfort (20 and 26 September) was significantly lower in rooms with green roof, green roof in those without (Figure 2); this is an indication that the proposed green roof prototype effectively mitigated the heat load of the ceilings of the rooms. Reductions in temperature observed (3.4 and 4.5 °C) are similar to those reported by Pandey *et al.* (2013) in conventional green roofs, although lower than that obtained by Liu and Baskaran (2003) and De Nardo *et al.* (2005), but higher than the results of Jaffal *et al.* (2012).

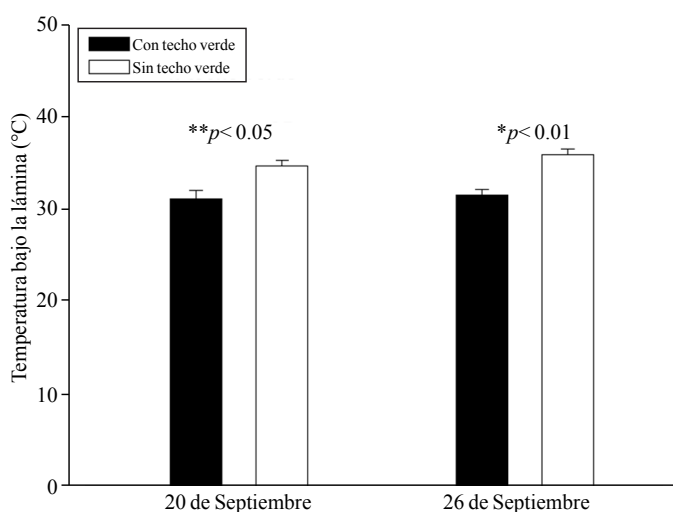


Figura 2. Temperatura promedio (+DE) bajo la lámina del techo de la habitación durante las evaluaciones de confort.
Figure 2. Average temperature (+ DE) under the ceiling of the room during evaluations of comfort.

detectar pequeñas diferencias ambientales entre las casas, por estar más familiarizados con sus viviendas. Asimismo, tanto el VMP como el PPD, correspondientes a los dos grupos evaluadores, fueron significativamente menores en las habitaciones con techo verde, que en aquellas sin éste (Figuras 5 y 6), observándose una falta de confort casi total y unánime, de acuerdo al PPD, en las habitaciones sin techo verde.

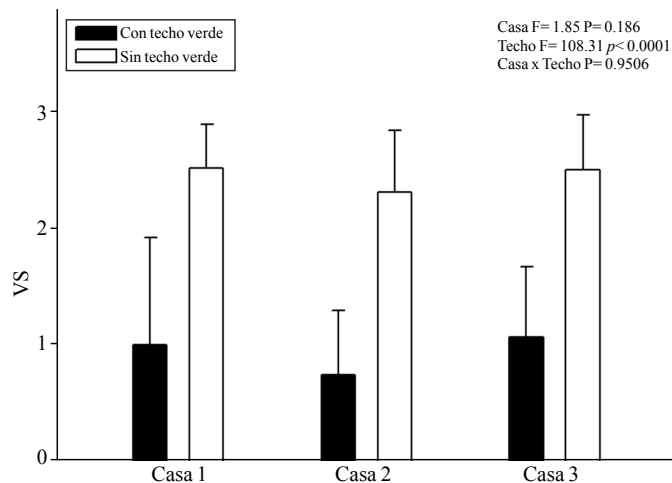


Figura 3. Promedio por casa del voto subjetivo del grupo residente (+DE).

Figure 3. Average per household of subjective vote of resident group (+DE).

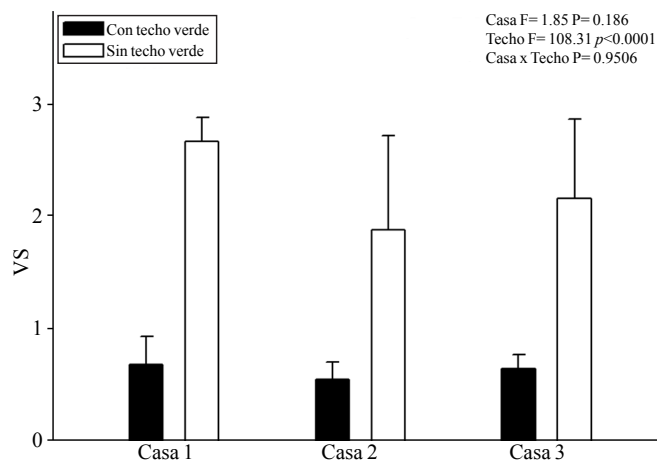


Figura 4. Promedio por casa del voto subjetivo del grupo visitante (+DE).

Figure 4. Average house subjective vote by the visiting group (+DE).

De acuerdo con el VMP, se esperaba que las personas de ambos grupos expresaran un menor confort que el mostrado por el VS. Al respecto, Nicol (2014) explica que diferencias como ésta, ocurren en parte porque el VMP tiende sobreestimar el no confort en condiciones de

The average resident SV group was 0.63 and 2.23, for the rooms with and without green roof, respectively, significant differences were detected due to the type of roof and between houses (Figure 3); SV the average visitor group was 0.94 and 2.44, for the rooms with and without green roof, respectively, with a statistically significant difference (Figure 4). It is possible that, unlike the visiting group, the resident was able to detect small environmental differences between the houses, being more familiar with their homes. Also, both the APV as PPU, corresponding to the two reviewers group, were significantly lower in rooms with green roof, than in those without it (Figures 5 and 6), showing a lack of near unanimous comfort, according PPU, in rooms without green roof.

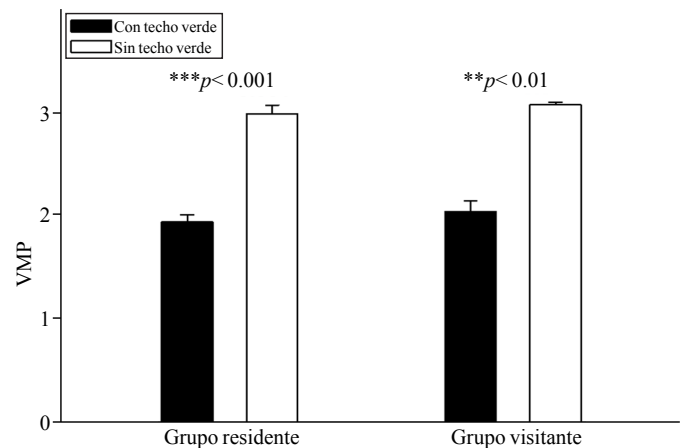


Figura 5. Voto medio predicho por tipo de techo (+DE) y grupo evaluador.

Figure 5. Average vote predicted by roof type (+DE) and evaluation group.

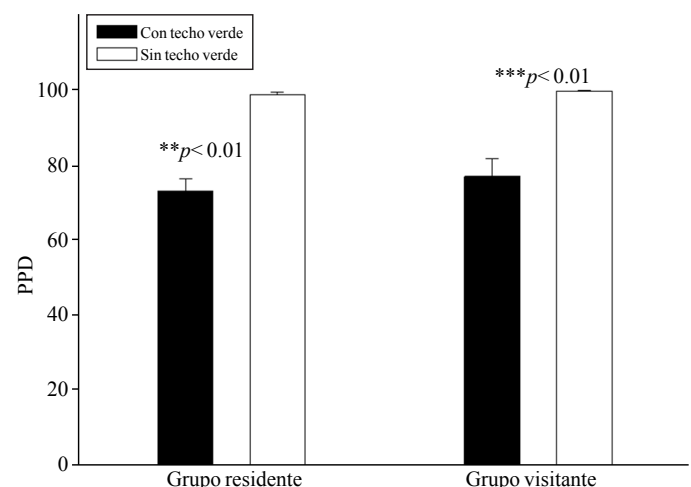


Figura 6. Porcentaje de personas a disgusto (+DE) por tipo de techo y grupo evaluador.

Figure 6. Percentage of people uncomfortable (+SD) type of roof and evaluation group.

altas temperaturas, en habitaciones de temperaturas no controladas mecánicamente, pero principalmente porque la temperatura que las personas encuentran confortable está en relación estrecha con la temperatura media que experimentan cotidianamente. Por ello es que este autor recomienda que siempre se lleven a cabo evaluaciones del VS, especialmente en zonas tropicales.

El índice de aceptación de los techos verdes por el grupo residente fue moderado, con promedio de 4.9 (mínimo de 4.2 y máxima de 6.2), mientras que el del grupo visitante fue alto, con promedio de 6.2 (mínimo de 4.8 y máximo de 7.5); el análisis de varianza mostró que hubo diferencias significativas entre grupos ($F=27.1$, $p<0.0001$), siendo mayor la aceptación del grupo visitante, lo cual es explicable considerando que el grupo se integró por jóvenes estudiantes. Estos resultados son relevantes pues es conveniente desarrollar propuestas tecnológicas que las personas estén dispuestas a implementar en sus viviendas, como ocurrió en este caso.

De conformidad con el objetivo y la hipótesis planteados, el prototipo de techo verde propuesto en el presente trabajo, al utilizar un diseño de pérgola, resultó más ligero que los techos verdes convencionales y pudo construirse sobre los techos de lámina de viviendas rurales, sin comprometer la estructura de éstas. Es de resaltar que la ausencia de las otras capas características de los techos verdes convencionales (Oberndorfer *et al.*, 2007) no impidió la mitigación significativa de la carga calórica y la mejoría del confort térmico de los habitantes de la vivienda. Los resultados de este estudio indican que en las viviendas rurales tropicales se alcanza un mayor confort térmico mediante el uso de techos verdes como el aquí propuesto.

Conclusiones

El prototipo de techo verde con la enredadera nativa *C. verticillata* disminuyó hasta 4.5° C la temperatura de las láminas de zinc de las habitaciones sobre las que fue construido. Las tres variables utilizadas para evaluar el confort térmico (VS, VMP y PPD) evidenciaron una mejoría significativa del confort térmico debido a la presencia del techo verde. La aceptación de los techos verdes por el grupo residente fue moderada, aunque significativamente menor que la aceptación por parte del grupo visitante.

According to the APV, it was expected that people from both groups expressed less comfort than that shown by the SV. In this regard, Nicol (2014) explains that differences like this occur in part because it tends to overestimate the APV no comfort in hot conditions at room temperature not controlled mechanically, but mainly because the temperature that people find comfortable is close relationship with the average temperature experienced daily. That is why this author recommends always carrying out assessments of SV, especially in the tropics.

The rate of acceptance of green roofs by the resident group was moderate, averaging 4.9 (minimum of 4.2 and maximum of 6.2), while the visiting group was high, averaging 6.2 (minimum of 4.8 and maximum of 7.5); analysis of variance showed that there were significant differences between groups ($F=27.1$, $p<0.0001$), with greater acceptance of the visiting group, which is understandable considering that the group was joined by young students. These results are relevant because it is desirable to develop technological solutions that people are willing to implement in their homes, as happened in this case.

In accordance with the purpose and hypotheses posed, the prototype green roof proposed in this paper, by using a pergola design, was lighter than conventional green roofs and could be built on the tin roofs of rural houses, without compromising the structure of these. It is noteworthy that the absence of the other layers characteristics of conventional green roofs (Oberndorfer *et al.*, 2007) did not prevent significant heat load alleviation and improvement of the thermal comfort of the inhabitants of the house. The results of this study indicate that in tropical rural households increased thermal comfort is achieved using green roofs as proposed here.

Conclusions

The prototype green roof with native vine *C. verticillata* decreased up to 4.5 °C temperature of the zinc sheets of the room on which it was built. The three variables used to evaluate the thermal comfort (SV, PMV and PPU) showed a significant improvement of thermal comfort due to the presence of the green roof. The acceptance of green roofs by the resident group was moderate, although significantly less than the acceptance by the visiting group.

End of the English version



Agradecimientos

Al Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Campus Veracruz, LPI-4 Agronegocios, Agroecoturismo y Arquitectura del Paisaje, MAP-Angostillo, y el Fideicomiso Revocable de Administración e Inversión (Núm. 167304) del Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, por el apoyo económico. Al CONACyT por la beca para estudios de postgrado otorgada a A. Beltrán Melgarejo.

Literatura citada

- American National Standards Institute (ANSI)- American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE). 2004. Standard 55-2004 thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. Atlanta, Georgia, USA. 55 p.
- Berardi, U.; Ghaffarian, H. A. and Ghaffarian H. A. 2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Appl. Energy*. 115(1):411-428.
- Currit, N. and Easterling, W. E. 2009. Globalization and population drivers of rural- urban land-use change in Chihuahua. *Mexico Land Use Policy*. 26(3):535-544.
- De Nardo, J. C.; Jarrent, A. R.; Manbeck, H. B.; Beattie, D. J. and Berghage, R. D. 2005. Storm water mitigation and surface temperature reduction by green roofs. *Transactions of ASABE*. 48(4):1491-1496.
- Del Barrio, E. P. 1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*. 27(2):179-193.
- Ekaterini, E. and Dimitris, A. 1998. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings*. 27(1):29-36.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México. 246 p.
- International Organization for Standardization (ISO 7730). 1995. Moderate thermal environments-determination of the PMV and PPD indices and specifications for thermal comfort, 2nd (Ed.). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland. 40 p.
- Hodo-Abalo, S.; Banna, M. and Zeghamati, B. 2012. Performance analysis of a planted roof as a passive cooling technique in hot-humid tropics. *Renewable Energy*. 39(1):140-148.
- Jaffal, I.; Ouldboukhitine, S. and Belarbi, R. 2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy* 43(1):157-164.
- Köhler, M. 2003. Plant survival research and biodiversity: lessons from Europe. *In: memories of the first annual greening rooftops for sustainable communities conference, awards and trade show*. 20-30 May. Chicago, Illinois, USA. 313-322 pp.
- Kvisgaard, B. 1997. Thermal comfort. *Innova air tech instruments A/S*. Denmark. 31 p.
- Liu, K. Y. and Baskaran, B. A. 2003. NRCC-46412: thermal performance of green roofs through field evaluation. National Research Council Canada. Ottawa, Ontario, Canada. 1-10 pp.
- Mas, J. F.; Velázquez, A.; Reyes, R.; Díaz-Gallegos, R.; Mayorga-Saucedo, A.; Alcántara, C.; Bocco, G.; Castro, R.; Fernández, T. and Pérez-Vega, A. 2004. Assessing land use cover changes: a nationwide multitemporal spatial database for Mexico. *Int. J. Appl. Earth Observation Geoinf.* 5(4):249-261.
- Nicol, F. 2004. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings* 36(7):628-637.
- Nilsson, L. and Håkansson, O. 2005. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. University of Gävle. Sweden. 202 pp.
- Oberndorfer, E.; Lundholm, J.; Bass, B.; Coffman, R. R.; Hoshi, H. and Dunnett, N. 2007. Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioSci.* 57:10-14.
- Pandey, S.; Hindoliya, D. A. and Mod, R. 2013. Experimental investigation on green roofs over buildings. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 8(1):37-42.
- Qin, X.; Wu X.; Chiew, Y. M. and Li, Y. 2012. A Green roof test bed for stormwater management and reduction of urban heat island effect in Singapore. *British J. Environ. Climate Change* 2(4):410-420.
- Statistical Analysis System (SAS). 2010. Enterprise guide v 4.3.0. SAS Institute, Inc. Cary, North Carolina, USA.
- Sokal, R. R. and Rohlf, F. J. 1981. *Biometry*. 2th Edition. Freeman and Company. New York, USA. 427 p.
- Tabares-Velasco, P. C. and Srebric, L. 2009. The role of plants in the reduction of heat flux through green roofs: laboratory experiments. *Ashrae transactions*. 115(2):793-802.
- Wong, N. H.; Chen, Y.; Ong, C. L. and Sia, A. 2003. Investigation of thermal benefits of rooftop gardens in the tropical environment. *Build. Environ.* 38(2):261-270.
- Zinzi, M. and Agnoli, S. 2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*. 55(1):66-76.