

Thermal Response to cold in buildings with Green covers for tropical climate. Green facades and green roofs

Reacción frente al frío de edificaciones con envolventes vegetales para climas tropicales. Fachadas verdes y cubiertas ajardinadas

N. Pérez Gallardo^{1*}, A. Rogério*, G. Figueiredo Neves*, F. Arthur Vecchia*, V. Figueiredo Roriz**

* Universidad de São Paulo, São Paulo. BRASIL

** Universidad Dom Pedro II. Rua Badi Bassiti, São José do Rio Preto. BRASIL

Fecha de Recepción: 02/08/2017

Fecha de Aceptación: 12/12/2017

PAG 15-28

Abstract

The main aim of this paper is to demonstrate the benefits that building using natural elements can provide to indoor environments when temperatures are lower. For this purpose, an experimental procedure was used to allow a comparison of the thermal behaviour of four systems: a prototype called Control (no vegetation) and three different combinations of vegetation (roofs and facades) installed in a region of tropical climate. They recorded simultaneously internal surface temperatures, internal air temperature and the external environmental conditions. The results show that the use of plant systems in buildings establishes a passive technique effective in reducing energy consumption, because of its insulation property and it maintains more pleasant thermal internal conditions than internal ones.

Keywords: Green facades, green roof, thermal performance, thermal comfort, bioclimatic architecture

Resumen

El objetivo de este trabajo es demostrar los beneficios que los sistemas constructivos con envolventes vegetales pueden ofrecer a los ambientes internos cuando las temperaturas son más bajas. Para ello, se ha utilizado un procedimiento experimental que permite la comparación del comportamiento térmico de cuatro sistemas: un prototipo llamado Control (sin vegetación) y tres con diferentes combinaciones de vegetación (cubiertas y fachadas) construidos en una región de clima tropical. Se registraron simultáneamente las temperaturas de las superficies internas, las temperaturas del aire interno y las condiciones del ambiente externo. Los resultados obtenidos demuestran que el uso de sistemas vegetales en la edificación constituye una técnica pasiva efectiva en la reducción del consumo de energía debido a su capacidad tanto de aislamiento térmico como de conservación de unas condiciones internas más agradables.

Palabras clave: Fachadas verdes, techos verdes, comportamiento térmico, confort térmico, arquitectura bioclimática

1. Introducción

El aumento de la población y su desarrollo en centros urbanos ha generado impactos medioambientales significativos como resultado de la concentración masiva de edificaciones, que sellan los suelos, reducen los espacios verdes e incrementan la contaminación. Todos los aspectos mencionados conducen hacia la modificación del comportamiento térmico a escala micro climática y genera lo que se ha denominado Isla de calor urbano (Vecchia, 2005).

La preocupación gradual sobre estos asuntos ha levantado un mayor interés por diseñar una arquitectura más sustentable. Así, los espacios verdes dentro de las ciudades pueden ser considerados como indicadores de la calidad medio ambiental. El uso de techos y fachadas con vegetación es una técnica que ha tenido un impacto positivo sobre el clima urbano, debido a las características de las plantas que crean áreas sombreadas, absorben parte de la radiación solar incidente y promueven la infiltración de las aguas lluvia y, en consecuencia, aumentan la humedad relativa; todos, factores que contribuyen a crear una isla de calor urbano.

Según (Dunnett and Kingsbury, 2008), la vegetación es una técnica que se ha usado durante siglos en todo el mundo para mejorar el confort térmico de las edificaciones. Esta es una de las razones por las que, en la actualidad, la técnica ha sido aceptada con gran interés. Además de los beneficios medio ambientales que ofrece, mejora el confort térmico interno y, por lo tanto, la eficiencia energética de las edificaciones. El uso de Fachadas verdes con plantas trepadoras es capaz de reducir la temperatura interna de los edificios debido a la sombra que se produce ahí. En invierno, este sistema también protege del frío y del viento, por la estructura ramificada que forman los tallos de las plantas que evita la pérdida del calor interno.

Este trabajo propone el estudio de Fachadas verdes y Techos verdes en un clima tropical en un día críticamente frío, mostrando los resultados experimentales de cuatro celdas de prueba en las que se midieron las temperaturas de las superficies internas y las temperaturas del aire interno de manera de poder realizar posteriormente un estudio comparativo entre las celdas de prueba con y sin vegetación. Con los resultados finales, se verificó el potencial que tiene la vegetación respecto de las pérdidas de calor interno, puesto que dicha pérdida de calor es una de las medidas más útiles en el sentido de mejorar las condiciones ambientales internas.

¹ Autor de Correspondencia:

Universidad de São Paulo, São Paulo. Brasil
E-mail: nuriapg@sc.usp.br



2. Materiales y metodos

Este proyecto sobre el uso de envolventes de plantas en la arquitectura intenta encontrar métodos de construcción que provoquen un menor impacto ambiental que la construcción convencional, y mejoren tanto el confort como la eficiencia energética interior. Para realizar las mediciones, se instalaron cuatro celdas experimentales con plantas en las

fachadas (norte y poniente) y techos, como se aprecia en la Tabla 1.

Los datos de las temperaturas de las superficies internas y la temperatura de bulbo seco (DBT) se midieron con termocuplas instaladas en las celdas de prueba. Los datos sobre la radiación solar y de otras variables climáticas fueron registradas por la estación meteorológica automática del Centro de Recursos Hídricos y Estudios Medio Ambientales (CRHEA) perteneciente a la Escuela de Ingeniería de São Carlos (EESC-USP), Brasil.

Tabla 1. Resumen de los tipos de celda de prueba usados

CONSTRUCCIÓN	UBICACIÓN DE LA VEGETACIÓN
Celda de Prueba de Control	Sin Vegetacion
Celda de Prueba 1	Fachadas Verdes (N y O)
Celda de Prueba 2	Techos Verdes
Celda de Prueba 3	Techos Verdes + Fachadas Verdes (N y O)

Para obtener los resultados, este estudio se basó en el análisis de un día frío crítico (día de invierno), definido como un día en que se registró, de manera excepcional, una temperatura mínima menor a las temperaturas máximas absolutas en la serie de datos históricos registrado en las Normales Climáticas 1961-1990, publicado en 1992 por el Departamento Nacional de Meteorología del Ministerio de Agricultura y Reforma Agraria, Brasil.

Los datos fueron medidos usando termocuplas instaladas en cuatro celdas de prueba ubicadas en las fachadas norte y poniente, y en los techos en el periodo comprendido entre el 7 y el 12 de julio de 2015.

2.1 Ubicación y características de la zona en estudio

Este proyecto se desarrolló en Itirapina, Estado de São Paulo, Brasil, en los márgenes de la represa Lobo, a 733m de altitud sobre el nivel del mar (Figura 1). Es una zona compleja de definir debido a las acciones de origen climático, siendo una región de transición entre los sistemas atmosféricos intertropical y polar, y ubicada en una zona considerada como de altitud tropical. Según la Clasificación Climática de Köppen, corresponde a un clima Cwa (subtropical húmedo), que se caracteriza como clima cálido, con inviernos secos, en que la temperatura promedio de los meses más fríos es menor a los 18°C y el mes más cálido sobrepasa los 22°C (Ferrari, 2012) (Figura 1).



Figura 1. Ubicación de la zona en estudio. Fuente: Elaboración propia

Las celdas de prueba medían 2 x 2,50m, asentadas sobre arena y mortero de cemento; fueron construidas in situ con ladrillos sólidos de 10 x 20 x 5cm, colocados con juntas de 1,5cm de espesor. Las construcciones tenían puertas de madera orientada hacia el oriente (este) y cuyas dimensiones eran de 2,10 x 0,60m y una ventana con marco de madera de 1 x 0,70m orientada hacia el norte (Figura 2). Las celdas de

prueba fueron diseñadas con la misma orientación, de manera que recibieran la misma radiación solar, viento y otros efectos atmosféricos. Esto permite que las condiciones climáticas actúen simultáneamente y con la misma intensidad en cada celda, como se aprecia en la Figura 2. Por otra parte, no crean zonas sombrías entre ellas.



Figura 2. Vista panorámica de las celdas experimentales. Fuente: Elaboración propia

2.2 Sistema constructivo y desarrollo de las fachadas verdes y techos verdes

Las fachadas verdes fueron instaladas en las fachadas norte y poniente porque eran las que recibían más horas de luz solar. Consistían, básicamente, en una malla metálica hexagonal de 2,40m de ancho por 3m de alto, anclada al suelo y a la fachada por medio de ganchos. La solución adoptada fue la que no tenía contacto directo con el muro, por lo que se decidió establecer un ángulo de 30° respecto de la parte superior del muro.

Después de colocar la malla, necesaria para permitir el crecimiento vertical de las plantas, y cubrir toda la superficie de las fachadas, se sembró *Thunbergia grandiflora*, de la familia de las Acanthaceae en la base de la malla, directamente en el suelo. Esta planta es una enredadera de bajo cuidado que crece en zonas tropicales y subtropicales en todo el mundo. Es una planta herbácea perteneciente a la familia de la Acanthaceae, trepadora, hojas simples, verde intenso y opuestas. La *Thunbergia grandiflora* se denomina comúnmente como *Thunbergia azul* (Figura 3A) y (Figura 3B), enredadera de trompeta azul, *Bignonia azul* (Martínez et al., 2002).



Figura 3. A. Las plantas trepan por una malla de alambre. B. Detalle de la flor de la *Thunbergia grandiflora*.
Fuente: Elaboración propia

Dos componentes importantes para asegurar la función de la planta en las fachadas son el ciclo de crecimiento anual y su desarrollo. A pesar de las dificultades de trabajar con seres vivos, las plantas tienen ciclos

constantes en cuanto a su desarrollo (Figura 4A y Figura4B). Sin embargo, estos lineamientos son específicos de la especie y dependen del clima en que se encuentra la planta (Pérez, 2010).



Figura 4. Detalle de las fachadas (A y B). Fuente: Elaboración propia

Las cubiertas verdes fueron construidas *in situ* usando planchas de arcilla prefabricada montada sobre vigas de concreto con una inclinación del 23% y parapetos de ladrillo cerámico de 0,40m de alto, formando un cajón donde

colocar el sustrato. Como se aprecia en la figura, los techos verdes están compuestos por una capa impermeable, una tela de drenaje, el sustrato y la vegetación, como se aprecia en la Figura 5 y Figura 6.

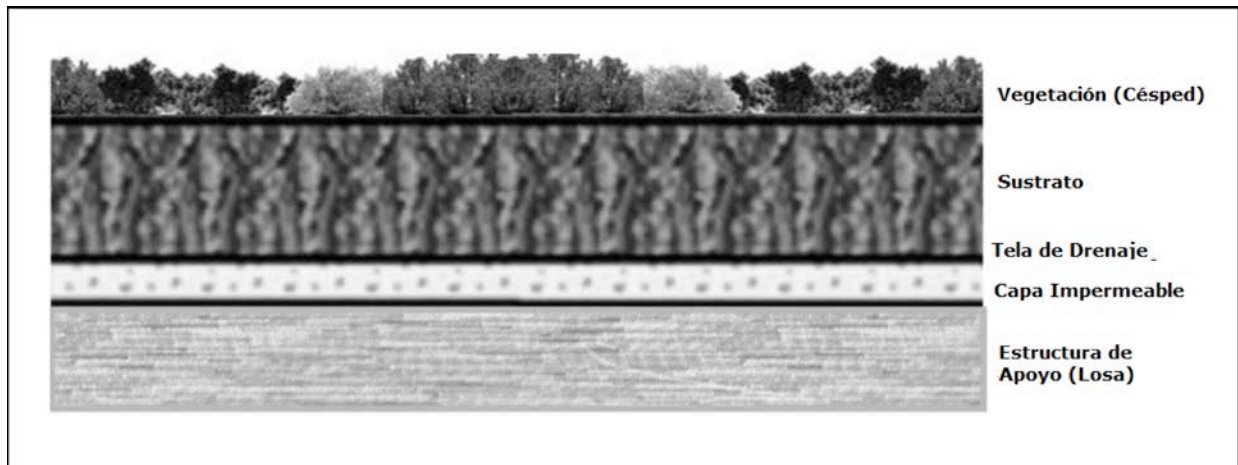


Figura 5. Perfil de un techo verde. Fuente: Elaboración propia



Figura 6. Construcción de cubiertas verdes (A) y (B). Fuente: Elaboración propia

A continuación se describe cada una de las partes que forman el sistema:

- Geotextil y drenaje:

Como elemento de drenaje se usó un geosintético MacDrain 2L, empleado comúnmente en las carreteras y otras obras civiles; es liviano y flexible, su núcleo de drenaje consiste en una geomalla tridimensional, compuesta por fibras de polipropileno, de entre 10 y 18 mm con un espesor, termosoldadas entre dos geotextiles con resina de poliéster en todos los puntos de contacto (Vecchia, 2005). Para el drenaje, se colocaron dos tubos de PVC en los extremos inferiores.

- Vegetación. pasto.

Se usó pasto *Paspalum notatum* como vegetación para cubrir los techos verdes (Figura 6), que es una hierba nativa del continente americano, conocida en Brasil como Batataisgrama, pasto horqueta, grama mato grosso, grama-de-pasto y pasto común (Lorenzi y Souza, 2000). Posee hojas concentradas en la base de la planta. Una de sus características más destacada es la facilidad para cubrir fácilmente el suelo, formando grandes alfombras, razón por la cual se usa en canchas de fútbol, áreas verdes y para la protección contra la erosión del suelo (Kissmann, 1997). La especie se adapta fácilmente a suelos pobres, escasez de agua, es muy resistente a la luz solar y al pisoteo. Sin embargo, se debe cortar con frecuencia para mantenerlo en buenas condiciones (Goatley et al., 1996) (Figura 7).





Figura 7. Detalle del pasto, *Paspalum notatum*. Fuente: Elaboración propia

Cada prototipo tenía 5 termocuplas tipo T de 2 x 24WG. Las termocuplas se consideran instrumentos bien precisos. La temperatura se puede medir con un error de $\pm 0,1 - 0,2^{\circ}\text{C}$ (Kinzie, 1973). Las mediciones se usaron para estudiar el comportamiento térmico. Razón por la cual se colocaron 64 termocuplas, 16 por elemento constructivo; 15 medían las temperaturas de las superficies (en cada celda de prueba) y una termocupla se colocó en el centro geométrico de cada celda de prueba a 1,20m de altura aproximadamente, con el fin de realizar las mediciones con

Temperatura de Bulbo Seco (DBT), como lo señala la norma ABNT NBR 15575-1, Anexo A.

Los datos se registraron a intervalos de 30 segundos y también a cada hora. Las mediciones se registraron con un equipo Datalogger CR1000 programable de Campbell Scientific Inc., conectado a dos multiplexers 416AM de 32 canales de Campbell Scientific Inc., ambos calibrados. La batería se alimentó con un panel solar para darle autonomía al equipo.

La Figura 8 muestra la distribución de las termocuplas.

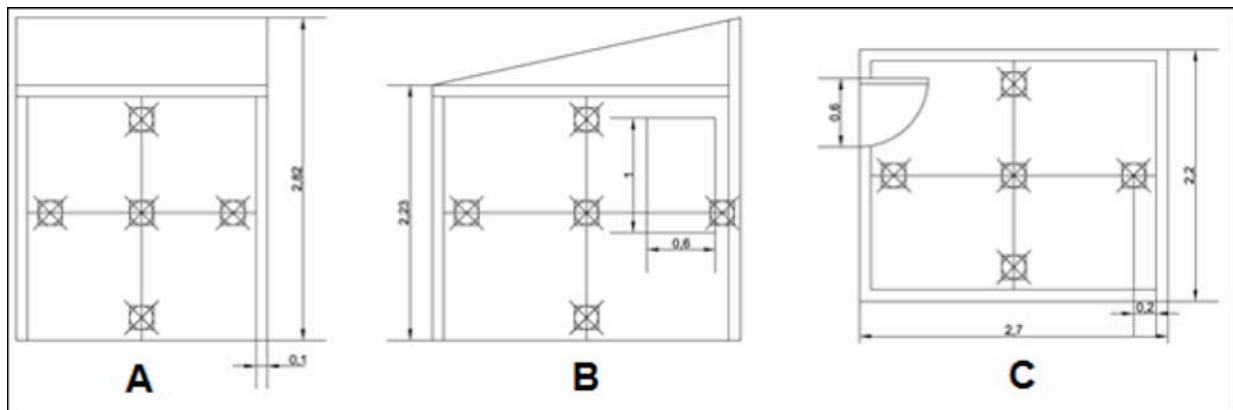


Figura 8. Distribución de las termocuplas tipo T (Copper-Constantan). A: En fachadas poniente. B: En fachadas norte. C: En techos. Fuente: Elaboración propia (fuera de escala)

3. Resultados experimentales y análisis

3.1 Análisis climático. día frío crítico experimental, 10 de julio de 2015

Bajo la perspectiva climática usada en este trabajo, el día crítico experimental se definió considerando el estado atmosférico dominante en el periodo de pruebas. Como referencia se usaron las Normales Climáticas 1961-1990 publicadas en 1992 por el Departamento Nacional de Meteorología del Ministerio de Agricultura y Reforma Agraria de Brasil (Series históricas de datos climáticos de Brasil).

Según (Vecchia, 1997), para realizar una estimación más precisa del clima, se puede hacer un análisis climático usando episodios representativos o periodos de observación de los tipos de clima, es decir, estudiando la intensidad y duración de cada masa de aire que domina en un lugar en particular, relacionado con el fenómeno de circulación atmosférica. Las consecuencias del avance de un frente frío sobre una localidad dada tiene características peculiares en cada estación climática analizada (otoño, invierno, etc.).

Desde el punto de vista de la climatología dinámica, Itirapina se caracteriza como una región de paso de frentes fríos durante todo el año. El dominio de las masas de aire que actúan en la región se puede dividir en dos etapas principales, prefrontal y pos frontal, que a su vez se subdividen en otras dos grandes etapas, la precursora y de avance, que suceden antes de la penetración de la Masa

Atlántica Polar (MPA) con características de borrasca. Después ocurren las fases de transición y dominante, donde la Masa Atlántica Polar (MPA) impone condiciones climáticas de características frías y a veces con precipitaciones (Monteiro, 1967).

Esta clasificación que es beneficiosa porque, de acuerdo a los requisitos del análisis climático frente al comportamiento térmico, puede determinar la etapa más adecuada para realizar los experimentos (Vecchia, 2005). Los datos provenientes de variables climáticas externas usadas en esta experiencia para el día en cuestión, fueron recopilados por el Centro de Recursos Hídricos y Estudios Medio Ambientales (CRHEA) perteneciente a la Escuela de Ingeniería de São Carlos (EESC-USP), Brasil.

En este caso de estudio, se consideró el episodio entre el 7 y 12 de julio de 2015 para su análisis, días en que la región noroeste del estado de São Paulo estuvo bajo el control de una masa de aire frío. En la Figura 9 se presenta un análisis climático del día seleccionado.

Al analizar las condiciones climáticas del mes de julio, se observa un día que podría considerarse como un día frío crítico experimental (10/07/2015) porque ese día quedó registrado como un día de clima excepcional, con un valor de radiación solar de 614 (W/m²) y una temperatura mínima por hora de 8,8°C, inferior a la temperatura mínima absoluta de la Serie Histórica (12,1°C) para ese periodo.

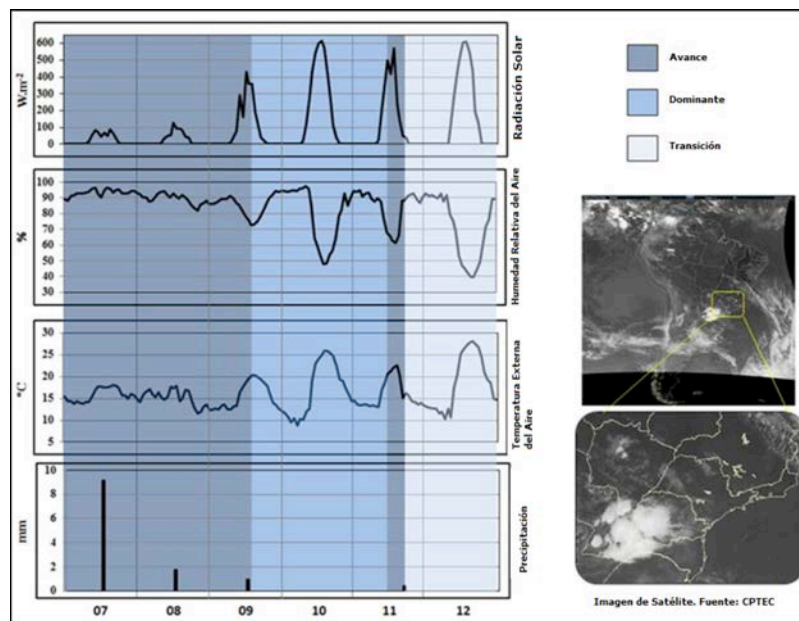


Figura 9. Análisis del clima. Episodio del 7-12 de julio de 2015. Fuente: Elaboración propia



3.2 Resultados de las temperaturas internas en el día frío crítico experimental: 10/07/2015

Como se mencionó en la sección anterior, los datos experimentales de este trabajo, en situación invernal, se registraron el día 10 de julio de 2015.

3.2.1 Temperatura del aire interno o temperatura de bulbo Seco (DBT)

En la Figura 10, el gráfico indica la temperatura del aire interno (DBT), la temperatura del aire externo y los límites de confort térmico.

El efecto esperado en un medio ambiente con vegetación debería ser una caída en la temperatura, que podría extender la incomodidad por el frío, especialmente en un episodio como el que se presentó el 10 de julio de 2015. Sin embargo, a pesar de la sombra de la edificación y del efecto de humidificación del aire, como se aprecia en la Figura 12, las alteraciones observadas son predominantes en el periodo de temperaturas máximas y, siempre en el sentido de minimizar la incomodidad.

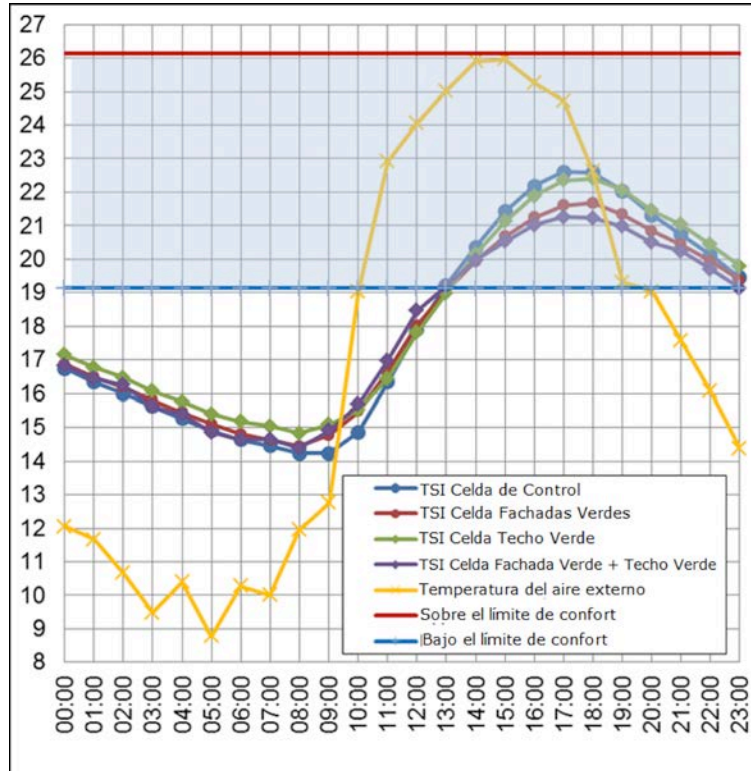


Figura 10. Evolución de las temperaturas del aire interno. Fuente: Elaboración propia

Además, se cuantificó los grados/horas de incomodidad a partir del método adaptativo indicado por la norma (ASHRAE 55, 2013). Esta metodología establece los límites de confort para cada día del año, ya sea para el 80% y 90% de personas satisfechas en construcciones ventiladas en forma natural. Para cuantificar los grados/horas de incomodidad fue necesario comparar las horas por hora, los

límites de temperatura (superior e inferior) y la temperatura de operación registrada en cada celda de prueba.

Los grados/horas (Figura 11) de incomodidad se generan cuando la temperatura interna excede los límites establecidos por la norma, siendo los números positivos para calor y los números negativos para el frío, como se muestra en el cuadro siguiente.

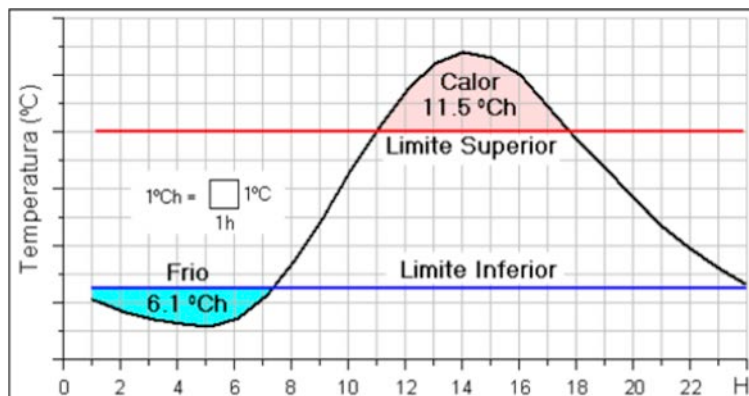


Figura 11. Grados/horas de incomodidad. Fuente: (Roriz et al., 2009)

Los límites de comodidad se obtuvieron con la siguiente ecuación (ASHRAE 2013).

$$\text{Límite superior 80\% satisfacción} = 0.31 t_{pma(out)} + 21.3 = 26.14^{\circ}\text{C}$$

$$\text{Límite inferior 80\% satisfacción} = 0.31 t_{pma(out)} + 14.3 = 19.14^{\circ}\text{C}$$

Donde, $t_{pma(out)}$ corresponde a la temperatura central en el rango de confort, calculada como el promedio de las temperaturas de los últimos 15 días, resultando en este caso un valor de $15,6^{\circ}\text{C}$.

En la Tabla 2, se presenta el resultado de los cálculos de las horas de incomodidad. No se registró ninguna hora para la incomodidad por calor, sin embargo, se observan varios grados/ hora de incomodidad por frío. El valor máximo (47°C/h) se registró en la celda de control y el valor mínimo ($41,41^{\circ}\text{C/h}$) en la celda con Techo verde, seguidos por la

celda de prueba con Fachadas verdes y Techo verde ($43,69^{\circ}\text{C/h}$).

Como se aprecia en la Figura 10, ese día se observó que durante la mañana, en las primeras horas de día, las cuatro celdas de prueba tenían el mismo comportamiento. Al momento en que se registra la temperatura de aire externo más baja ($8,78^{\circ}\text{C}$ a las 5h), se puede ver que las temperaturas internas mínimas (15°C) se registran en la celda con Fachada verde, celda de control y en la celda con Techo verde.

En contraste, a la misma hora, se registra una mayor temperatura de aire en la celda con Techo verde ($15,4^{\circ}\text{C}$). Además, cabe señalar que desde que se registra la temperatura externa mínima hasta que se registra la temperatura mínima del aire interno, existe un retardo térmico de 4 horas, ya que las temperaturas internas mínimas registradas ocurrieron a las 9h.

Tabla 2. Grados/Horas de incomodidad

GRADOS/ HORAS DE INCOMODIDAD, DIA 07 DE JULIO DE 2015		
CASOS	CALOR	FRÍO
TSI Celda de Control	0.00	-47.26
TSI Celda Fachada Verde	0.00	-44.19
TSI Celda Techo Verde	0.00	-41.41
TSI Celda Fachada Verde + Celda Techo Verde	0.00	-43.69

La diferencia entre las temperaturas del aire interno en las tardes no son excesivas, puesto que, según los datos, se puede ver que la mayor diferencia entre las temperaturas del aire interno de las cuatro celdas (sólo 2°C) se encuentra entre la celda de prueba construida con materiales convencionales ($22,6^{\circ}\text{C}$ a las 18h) y la celda dotada con Fachadas verdes y Techo verde ($21,2^{\circ}\text{C}$ a las 18h).

El comportamiento de las curvas de temperatura del aire interno cuando se registra la máxima temperatura externa ($25,9^{\circ}\text{C}$ a las 14h) señala que existe un retardo térmico de 4h respecto de las temperaturas del aire interno registradas.

La tabla siguiente expone una amplitud de la temperatura externa de 17°C , mientras que, en los ambientes interiores es de alrededor de 7°C para todas las celdas de prueba. Véase Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de la variación de la temperatura en las temperaturas del aire interno

TEMPERATUR DEL AIRE INTERNO	DBT ($^{\circ}\text{C}$) Celda de Control	DBT ($^{\circ}\text{C}$) Celda Fachadas Verdes	DBT ($^{\circ}\text{C}$) Celda Techos Verdes	DBT ($^{\circ}\text{C}$) Celda Fachadas Verdes + Celda Techos Verdes
$T^{\circ}\text{C}$ Min.	14,23	14,4	14,84	14,39
$T^{\circ}\text{C}$ Max.	22,61	21,67	21,41	21,26
$\Delta T^{\circ}\text{C}$.	8,38	7,27	6,57	6,87



3.2.2 Temperatura de la superficie interna de las fachadas norte

Las temperaturas de las superficies internas de las fachadas norte, como se aprecia en la Figura 12, a primera

hora de la mañana, cuando se registran las temperaturas externas mínimas, presentan una diferencia entre los valores registrados en las celdas de prueba de alrededor de 1°C y 6°C respecto de la temperatura externa.

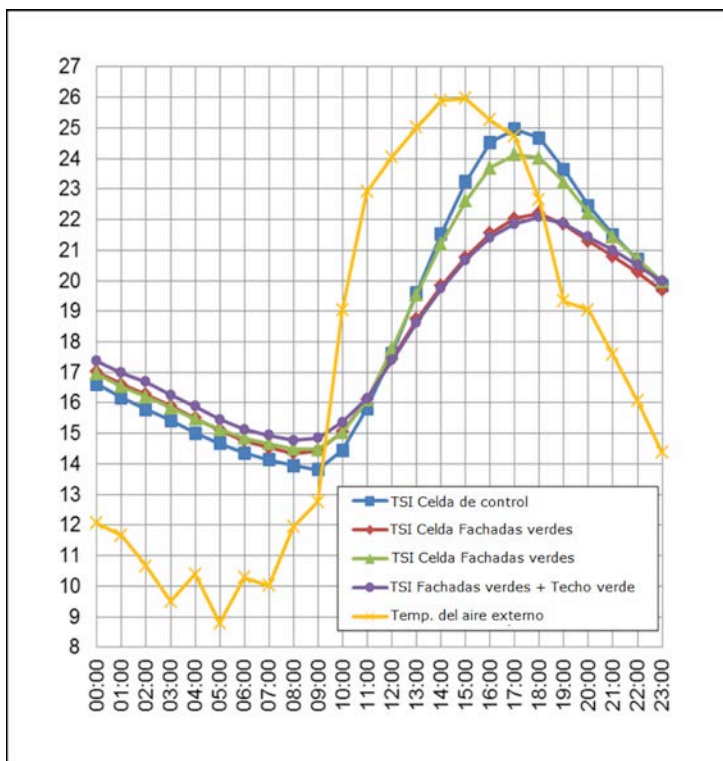


Figura 12. Gráfico de las temperaturas de la superficie interna de las fachadas norte vs. la temperatura del aire externo Temp. del aire externo. Fuente: Elaboración propia

A las 18h, se registraron las temperaturas mínimas de la superficie de las fachadas norte en dos celdas cubiertas con vegetación, esto es, en la celda con Fachadas Verdes y la celda con fachadas verdes y techo verde. El valor de la temperatura fue de 22°C, es decir, 2°C menos que las temperaturas de las fachadas norte desprovistas de vegetación (celda de materiales convencionales y celda con techo verde). Además, la diferencia respecto de la temperatura máxima externa fue de 4°C.

Dado que para una amplitud térmica externa de 17°C, se observó una amplitud térmica interna de 7°C para las celdas con vegetación en sus fachadas norte, y una amplitud térmica de 11°C para las celdas con fachadas de ladrillo de cerámica sólidos, se puede decir que las fachadas verdes tienen un mejor comportamiento respecto de la temperatura de la superficie interna que las construidas con fachadas de ladrillo (Tabla 4).

Tabla 4. Amplitudes térmicas en las fachadas norte. Fuente: Elaboración propia

FACHADAS NORTE	TSI (°C) CELDA DE CONTROL	TSI (°C) CELDA DE FACHADAS VERDES	TSI (°C) CELDA DE TECHOS VERDES	IST (°C) CELDA DE FACHADAS VERDES + TECHOS VERDES
T°C Min.	13,8	14,3	14,5	14,8
T°C Max.	25	22,2	24,1	24,1
ΔT°C.	11,2	7,9	9,6	9,3

3.2.3 Temperatura de la superficie interna de las fachadas poniente

Las fachadas poniente tienen el mismo comportamiento que las fachadas norte ya discutidas. A primera hora del día, cuando se registran las temperaturas más bajas del día, se registró la menor temperatura de la superficie interna en la celda construida con materiales convencionales.

Las demás celdas de prueba mostraron la misma temperatura hasta el momento en que la temperatura externa comenzó a subir. La temperatura externa más alta (26°C) se produjo a las 14h. Las dos celdas sin vegetación en sus fachadas poniente (Celda de control y celda con techo verde)

presentaron las mayores temperaturas (22,8°C) a las 18h, es decir, existe una diferencia de alrededor de 3°C respecto de la temperatura externa y con un retardo térmico de 4h.

A la inversa, las temperaturas más bajas se encontraron en las dos celdas con vegetación en sus muros (Celda con fachadas verde y celda con fachadas y techo verde) de 21,5°C a las 18h, es decir, con una diferencia de casi 5°C con la temperatura externa y un retardo térmico de 4 horas.

La Figura 13 presenta el gráfico de las temperaturas de las superficies internas en las fachadas poniente versus la temperatura del aire externo..

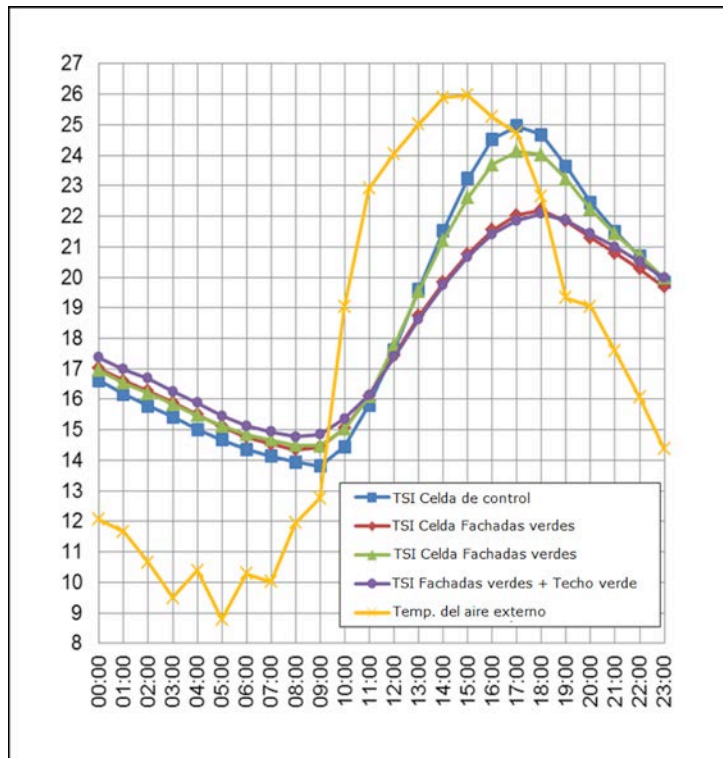


Figura 13. Temperatuta de la superficie interna de las fachadas poniente vs. la temperatura del aire externo. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 5, se describen las amplitudes térmicas registradas en cada celda de prueba. Se puede apreciar que las amplitudes más altas se presentan en la celda de control (9°C) (materiales convencionales) y en la con techo verde

(8,2°C). Al contrario, las temperaturas más bajas se observaron en la celda construida con fachadas verdes y en la celda fachadas verdes y techo verde (aprox. 7°C).

Tabla 5. Amplitudes térmicas en las fachadas poniente. Fuente: Elaboración propia

FACHADAS ESTE	TSI (°C) CELDA DE CONTROL	TSI (°C) CELDA DE FACHADAS VERDES	TSI (°C) CELDA DE TECHOS VERDES	IST (°C) CELDA DE FACHADAS VERDES + TECHOS VERDES
T°C Min.	13,9	14,4	14,6	14,8
T°C Max.	22,9	21,6	22,8	22,1
ΔT°C.	9	7,2	8,2	7,3

3.2.4 Temperatura de la superficie en los techos

En la Figura 14, se presenta la evolución de las temperaturas de las superficies internas de los cuatro techos para el periodo dado.

Durante las primeras cuatro horas del día, cuando se registran las temperaturas internas y externas más bajas, se observa que las dos celdas con techos contruidos con tejas de arcilla presentan las temperaturas más bajas de las superficies internas. Sin embargo, las dos celdas con vegetación en sus techos presentaron las temperaturas internas más altas, aunque esta diferencia en la temperatura no excede de dos grados. Sin embargo, existe una diferencia celdas de pruebas equipadas con vegetación en sus techos.

de casi 8°C en la temperatura externa con respecto de las Además, se aprecia un retardo térmico de tres horas.

Durante el periodo del día, cuando se registran las temperaturas más altas, es decir, en la tarde, la temperatura más alta se observó en la celda construida con materiales convencionales (22,8°C a las 18h) seguida por la celda equipada con fachadas verdes (22,1°C a las 18h). A la inversa, la temperatura más baja entre las máximas se dio en la celda con fachadas verdes y techo verde (20,6°C a las 19h), seguida por la celda con techo verde (21,5°C a las 19h).

En la tarde, se observó un retardo térmico de 4 horas entre las celdas construidas con vegetación en sus techos, mientras que las celdas construidas con techos con tejas de arcilla registraron un retardo térmico de 3 horas.

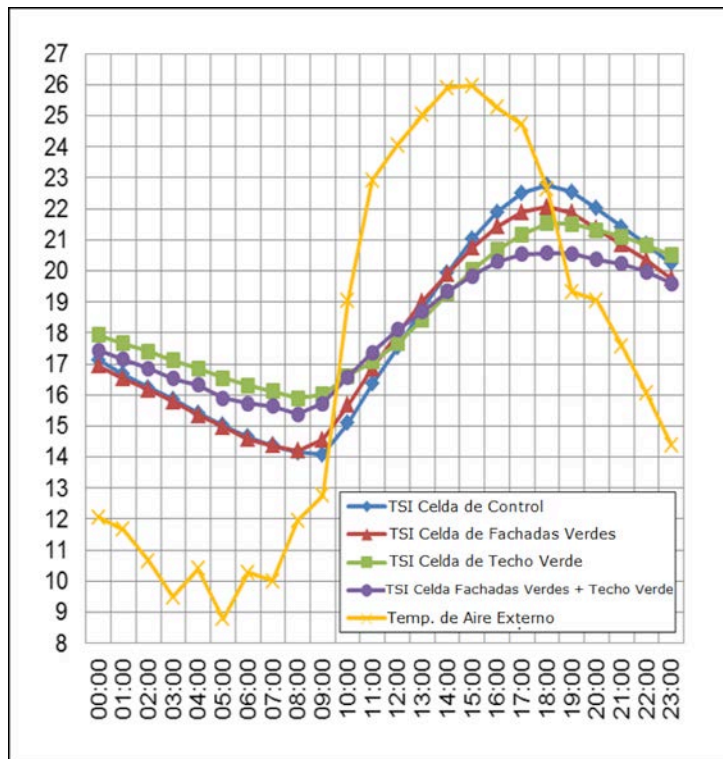


Figura 14. Temperatura de las superficies internas de los techos vs. la temperatura del aire externo. Fuente: Elaboración

La amplitud térmica más baja se registró en la celda cubierta con vegetación (5°C) en fachadas y techo, y la amplitud térmica más alta (8°C) se registró en la celda de

control, construida con materiales convencionales. La Tabla 6 resume las amplitudes térmicas señaladas.

Tabla 6. Resumen de las amplitudes térmicas de los techos

TECHOS	TSI (°C) CELDA DE CONTROL	TSI (°C) CELDA DE FACHADAS VERDES	TSI (°C) CELDA DE TECHOS VERDES	IST (°C) CELDA DE FACHADAS VERDES + TECHOS VERDES
T°C Min.	14,1	14,2	15,9	15,4
T°C Max.	22,8	22,1	21,5	20,6
ΔT°C.	8,7	7,9	5,6	5,2

4. Conclusiones

Con este estudio del comportamiento térmico usando envolventes de vegetación para los periodos fríos en clima tropical se puede concluir que la vegetación puede reducir la variación de las temperaturas internas. La temperatura interna de las celdas de prueba con envolvente de vegetación en sus fachadas y techo mantiene una temperatura estable en el ambiente interno. En las primeras horas del día, momento en que se registran las temperaturas externas más bajas, se observó que las temperaturas internas eran más altas.

En los periodos en que se registran las temperaturas del aire externo más altas, la celda de prueba construida con fachadas verdes y techo verde mostró las amplitudes térmicas más bajas, es decir, tiene menos dificultad para transferir el calor hacia el exterior. Las temperaturas del aire interno más altas se presentaron en la celda construida con materiales convencionales y la más baja en la celda con fachadas verdes y techo verde, con una diferencia entre ellas de 1°C.

Las temperaturas de las superficies internas de los muros con vegetación, ambas fachadas y techo, fueron más resistentes a las variaciones de las temperaturas diarias.

La mayor diferencia entre las temperaturas máximas de las superficies internas del techo, ocurrió entre la celda de control y la celda con fachadas verdes y techo verde, con un valor de 2,2°C. Por lo tanto, de acuerdo a estos resultados, se puede concluir que el uso de vegetación en las edificaciones durante el invierno tropical, protege las cubiertas (techos y fachadas) de la posible pérdida de calor, puesto que la vegetación actúa como aislante. Los resultados obtenidos muestran que las celdas protegidas con plantas mantienen la temperatura del aire interno casi 2°C por sobre las demás celdas en los periodos más fríos.

Por último, cabe señalar que el uso de vegetación en la arquitectura es una técnica viable, con múltiples usos para el tipo de clima estudiado y que además, aporta beneficios medio ambientales, beneficios térmicos internos que pueden mejorar el confort térmico de los usuarios de la edificación.

5. Referencias

- ASHRAE 55 (2013)**, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Determining Acceptable Thermal Conditions in occupant - Controlled naturally conditioned spaces
- ABNT. NBR 15575 (2013)**, Brazilian association of technical standards. Desempenho térmico de edificações. Parte 1- Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos.
- Dunnett N., and Kingsbury N. (2008)**, Planting Green Roofs and Living Walls. Portland, OR: Timber Press.
- Ferrari A. L. (2012)**, Variabilidade e tendência da temperatura e pluviosidade nos municípios de Pirassununga, Rio Claro, São Carlos e São Simão (SP): Estudo sobre mudança climática de curto prazo em escala local. Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos.
- Goatley J. M., Malldox V. L., Watkins R. M. (1996)**, Growth regulation of bahiagrass (*Paspalum notatum* Fluegge) with imazaquin and AC 263,222. HortScience, v. 31, n. 31, p. 396-399. Consulted 06/10/2015
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000088&pid=S0100-8358200200030002000004&lng=en>
- Kinzie P. A. (1973)**, Thermocouple Temperature measurement. New York. John Wiley and Son. Inc.,
- Kissmann K. G. (1997)**, Plantas infestantes e nocivas. 2.ed. São Paulo: BASF Brazilian. p. 679-684. Consulted 08/04/2015
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000077&pid=S0100-8358200300010002000004&lng=en>
- Lorenzi H., Souza H. M. (2000)**, Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. Nova Odessa: Plantarum. 349 p. Consulted 18/06/2015 < http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000104&pid=S0100-8358200200030002000012&lng=en>
- Martinez E., Scoones C., Paladini E. (2002)**, Thunbergia laurifolia lindl. (acanthaceae) exotic climber cultivated in argentina. Multequina, vol.11, n.1, pp. 61-64 Mendoza. Consulted 7/08/2015< http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1852-73292002000100004&script=sci_abstract&lng=en>
- Monteiro C. A. F. (1967)**, A dinâmica climática e as chuvas do Estado de São Paulo: estudo geográfico sob a forma de Atlas. São Paulo: University of São Paulo, Institute of Geography.



- Pérez G. (2010)**, Medida experimental de la contribución de las cubiertas y fachadas verdes al ahorro energético en la edificación en España. Ensayos con arquitectura vegetada. Seguridad y medio ambiente. Nº 118. Consulted 23/01/2015 <
https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1059105>
- Roriz, M.; Chvatal, K. M. S., Cavalcanti, F. S. (2009)**, Sistemas constructivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. In. X ENCAC and VI Elacac- National Meetings and Latin American Comfort in the built environment. 2009, Natal. Anais... X ENCAC and VI ELACAC. Consulted 09/07/2015 <
http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0276/Desempenho_Termico/Roriz_Chvatal_Cavalcanti_2009_Baixa_Resistencia_Termica.pdf>
- Vecchia, F. A. S. (2005)**, Climatologia aplicada ao ambiente construído. Análise do clima, avaliação e prevenção do comportamento térmico de edifícios ocupados. Escola de Engenharia de São Carlos, University of São Paulo.
- Vecchia, F. A. S. (1997)**, Clima e ambiente construído: Abordagem dinâmica aplicado ao conforto humano, University of São Paulo, São Paulo.
- Vecchia, F. A. S. (2005)**, Cobertura verde leve (CVL): ensaio experimental. In. XIII ENCAC IV ELACAC. National Meetings and Latin American Comfort in the built environment. 2005. Anais... XIII ENCAC e IV ELACAC.