

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIENCIAS DA ENGENHARIA AMBIENTAL

NURIA PÉREZ GALLARDO

**RESPUESTA TÉRMICA DE EDIFICACIONES CON ENVOLVENTES
VEGETALES: CUBIERTAS VERDES Y FACHADAS VERDES.**

São Carlos
2017

NURIA PÉREZ GALLARDO

Respuesta térmica de edificaciones con envolventes vegetales: cubiertas verdes
y fachadas verdes.

Tesis presentada para el Programa de Post-Graduación en Ciências da Engenharia Ambiental de la Universidad de São Paulo, para la obtención del título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería Ambiental.

Área de concentración: Ciencias de la Ingeniería Ambiental.

Orientador: Prof. Assoc. Francisco Arthur da Silva Vecchia.

São Carlos
2017

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P438r Pérez Gallardo, Nuria
Respuesta térmica de edificaciones con envolventes
vegetales: cubiertas verdes y fachadas verdes / Nuria
Pérez Gallardo; orientador Francisco Vecchia. São
Carlos, 2017.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área
de Concentração em Ciências da Engenharia Ambiental --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2017.

1. Cubiertas ajardinadas. 2. Fachadas verdes. 3.
Bioarquitectura. 4. Confort térmico. 5. Desempenho
térmico. 6. Comportamiento térmico. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **NURIA PEREZ GALLARDO**.

Título da tese: "Resposta térmica de edificações com envoltivos vegetais: coberturas verdes e fachadas verdes".

Data da defesa: 16/03/2017.

Comissão Julgadora:

Prof. Associado **Francisco Arthur da Silva Vecchia**
(Orientador)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Resultado:

Francisco Vecchia
APROVADA

Prof. Associado **Adriano Rogério Bruno Tech**
(Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos/FZEA-USP)

Adriano Tech
Aprovado

Prof. Dr. **Érico Masiero**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Érico Masiero
APROVADA

Profa. Dra. **Rosângela de Oliveira Colabone**
(Academia da Força Aérea/AFA)

Rosângela Colabone
Aprovada

Prof. Dr. **Victor Figueiredo Roriz**
(Faculdades Integradas Dom Pedro II)

Victor Roriz
Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Luís Fernando Costa Alberto**

Dedico este trabajo a mis padres.

Agradecimientos

Dejo aquí mis agradecimientos a todas las personas que, de alguna forma, directa o indirectamente contribuyeron en este trabajo, especialmente a:

A mi coordinador, Prof. Assoc. Francisco Vecchia, por la orientación, por la confianza y por darme oportunidad de vivir esta aventura brasileña que no solo me trajo muchos conocimientos, sino que me hizo crecer académica y personalmente, mi sincero agradecimiento.

Al Profesor Adriano Tech por la paciencia, interés y motivación que me transmitió, además de su positivismo que en todo momento ha estado latente, mi sincero agradecimiento.

A mi amigo y Profesor Evaldo, que unió mi destino con Brasil, y me abrió las puertas de su casa, gracias por el cariño y protección siempre, pero sobre todo por su amistad verdadera, mi más sincero agradecimiento.

A los técnicos de la Estación Climatológica de CRHEA, Betão y André por la colaboración en el desarrollo experimental de este trabajo.

A todos los integrantes del Núcleo de Climatología Aplicada al Medio Ambiente por el compañerismo, amistad y cariño que siempre demostraron.

A Cristina, por la amistad, las terapias psicológicas, por la fuerza, por el amor y sobre todo por estar siempre tan cerca en la distancia que nos separa, mi más sincero agradecimiento.

A mis padres, hermanos, primas y tíos, que supieron darme siempre el apoyo necesario, por el amor y la confianza demostrada, sin ellos este momento no hubiera sido posible.

A Salomão, por su amor y cariño en los momentos difíciles, mi más sincero agradecimiento especialmente por estar siempre presente.

A CNPq por el auxilio financiero y de infraestructura.

“Cada "tic-tac" es un segundo de la vida que pasa, huye, y no se repite. Y hay en ella tanta intensidad, tanto interés, que el problema es sólo saberla vivir. Que cada uno lo resuelva como pueda”.

-FRIDA KAHLO

En memoria de mi Gran amiga María Vela. Siempre te recordaré.

RESUMO

GALLARDO, N.P. **Resposta térmica de edificações com envoltentes vegetais:** coberturas verdes e fachadas verdes. 2017. 123p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

O presente estudo propôs um método experimental de obtenção das temperaturas internas de quatro células de teste com o objetivo de analisar comparativamente a influência do uso da vegetação no desempenho térmico do ambiente construído frente ao frio e ao calor em uma região de clima tropical de altitude. Em três células de teste foram utilizadas diferentes combinações de vegetação, aplicadas externamente (fachadas e coberturas), e uma célula foi mantida sem vegetação (célula controle). Foram obtidas as temperaturas superficiais internas (TSI) e temperaturas de bulbo seco (TBS) por meio de sensores de temperatura conectados a um sistema de armazenamento de dados durante o período de um ano e de onde foram selecionados os dias críticos experimentais a serem estudados. Os dados das principais variáveis climáticas foram registrados pela estação meteorológica automática do Centro de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (CRHEA) da Universidade de São Paulo (USP) em Itirapina-SP, local onde foi conduzido o estudo. A análise da influência das oscilações do tempo meteorológico (episódios climáticos) no ambiente construído foi realizada a partir das abordagens espacial e temporal da Climatologia Dinâmica, possibilitando a identificação de episódios climáticos e suas repercussões sobre os valores das temperaturas obtidas das células de teste. Os resultados indicaram que as células de teste com vegetação na cobertura e nas fachadas apresentaram maior resistência às variações de temperaturas diárias, ou seja, melhor desempenho térmico, por apresentar menores amplitudes térmicas, maiores atrasos térmicos, menores temperaturas em dias de calor extremo e maiores temperaturas em dias de frio. Durante o dia crítico de calor a maior diferença das temperaturas máximas internas do ar obtidas (TBS) foram observadas entre a célula controle e a célula com cobertura e fachadas verdes, com valor de 2°C e, no caso das temperaturas superficiais internas (TSI) foi observada uma diferença em torno de 3°C. Para o dia crítico de frio a diferença entre temperaturas máximas internas do ar foi de 1°C e, no caso das temperaturas superficiais internas, de 2,2°C. Analisando os resultados foi possível verificar que uso de vegetação pode ser considerado uma técnica capaz de manter as condições internas mais amenas não só em épocas de altas temperaturas, ao reduzir a incidência da radiação solar direta, como também no inverno, devido à sua propriedade de isolante térmico que impede as rápidas perdas de calor, como ocorre com os materiais de construção convencionais. Os resultados obtidos mostram que as hipóteses iniciais foram comprovadas ao mostrar que a utilização de vegetação combinada em fachadas e telhados contribui na melhora do desempenho térmico no ambiente construído favorecendo as condições térmicas internas durante períodos de maior ou menor temperatura externa.

Palavras chave: Coberturas verdes. Fachadas verdes. Bioarquitetura. Conforto térmico. Desempenho térmico. Comportamento térmico.

RESUMEN

GALLARDO, N.P. **Respuesta térmica de edificaciones con envolventes vegetales: cubiertas verdes y fachadas verdes.** 2017. 123p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

El presente proyecto propuso un método experimental de medición de temperaturas internas con el fin de estudiar, comparar y entender la respuesta térmica frente al frío y al calor de cuatro células de ensayo denominadas Control (Sin vegetación) y tres células de ensayo con diferentes combinaciones de vegetación (cubiertas y fachadas) instaladas en una región de clima tropical. En ellas fueron medidas las temperaturas superficiales internas (TSI) y temperaturas del Bulbo Seco (TBS) mediante equipos específicos, un data logger, conectado a dos multiplicadores. Los datos fueron recogidos por un año y dentro de ese periodo fueron seleccionados los días críticos a estudiar. Varios datos climatológicos fueron considerados para abordar la influencia de las oscilaciones del tiempo meteorológico (episodios climáticos) en el ambiente interno construido, para lo cual fueron aplicados fundamentos de la Climatología Dinámica frente al comportamiento térmico de las células de ensayo. Los datos de las principales variables climáticas (radiación solar, humedad relativa y precipitación) fueron registradas en la Estación Meteorológica del CRHEA. Los resultados revelan que la célula de ensayo con vegetación en cubierta y fachadas, presenta más resistencia a las variaciones de temperaturas diarias, es decir, mejor comportamiento térmico, ya que muestra las menores amplitudes térmicas, los mayores retrasos térmicos, las menores temperaturas en días de calor extremo y las mayores en días de frío. Durante el día crítico de calor, las mayores diferencias entre las temperaturas máximas internas del aire, se presentan entre la célula construida con materiales convencionales y la célula que posee fachadas verdes y cubierta vegetal, de 2°C y en torno a 3°C en el caso de las temperaturas superficiales. Para el día crítico de frío, la diferencia entre ellas es de 1°C para los valores de temperatura del aire, y de 2.2°C para valores de temperaturas superficiales. Así, uso de vegetación en los edificios puede ser considerado una técnica capaz de mantener las condiciones internas más placenteras no solo en épocas calurosas, reduciendo la incidencia de la radiación solar directa, sino también en invierno, debido a su propiedad de aislante térmico que impide las rápidas pérdidas de calor, como ocurre en la célula sin vegetación. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que las hipótesis planteadas fueron alcanzadas, comprobando así, que el uso de vegetación combinado en fachadas y cubiertas contribuye a la mejora del comportamiento térmico, favoreciendo las condiciones térmicas internas en periodos de mayor o menor temperatura externa.

Palabras clave: Cubiertas ajardinadas. Fachadas verdes. Bioarquitectura. Confort térmico. Comportamiento térmico.

ABSTRACT

GALLARDO, N.P. **Thermal response in buildings with green covers: green roofs and green facades.** 2017. 123p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

The present research proposed an experimental method for measuring internal temperatures of buildings, in order to study, compare, and understand the thermal response of four test cells against cold and heat, determined: control (without vegetation) and three test cells with different combinations of vegetation (on roofs and/or facades); installed in a tropical climate region. Internal surface temperatures (IST) and dry bulb temperatures (DBT) were measured using appropriate equipment, consisting of a data logger connected to two multipliers. Data were collected for one year and, during that period, the critical days that would be assessed were selected. Climatic data were considered in order to evaluate the influence of weather oscillations (climatic events) on the internal built environment, for which the principles of Dynamic Climatology were applied to understand the thermal behaviour of the test cells. The data obtained from the primary climatic variables (solar radiation, relative humidity, and precipitation) were recorded at the CRHEA. The results showed that the test cell with a green roof and green facades displayed higher resistance to changes in daily temperature, i.e., better thermal behavior, since it faced lower temperature intervals, higher thermal delays, lower temperatures on days of extreme heat, and higher temperatures on cold days. With respect to the critical heat day, the main differences between maximum internal air temperatures occurred between the cell constructed with conventional material and the cell that was built with green facades and a green roof, of 2°C in relation to the internal air temperature, and approximately 3°C with respect to surface temperatures. Regarding the critical cold day, the difference between test cells was of 1°C for air temperature values, and 2.2°C for surface temperature values. Therefore, the use of vegetation in construction can be considered a technique capable of maintaining the most pleasant indoor conditions, not only in hot climates, reducing the incidence of direct solar radiation, but also in the winter, due to thermal insulation properties that prevent the rapid loss of heat, which occurs in cells lacking vegetation. The obtained results show that the initial hypotheses were proven, thus confirming that the application of vegetation on facades and roofs contributes to the improvement of thermal performance, favoring internal thermal conditions during periods of higher or lower external temperatures.

Keywords: Green facades. Green roofs. Bioarchitecture. Thermal comfort. Thermal performance.

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Ilustración representativa de los Jardines Suspendidos de Babilonia.....	19
Figura 2. Clasificación de las fachadas verdes.....	22
Figura 3. Detalle de crecimiento de Fachada verde directa, casa privada, Golegã, Portugal.....	23
Figura 4. Detalle de construcción de fachada verde indirecta.....	23
Figura 5. Sistema de muro vivo continuo, Caixa Forum, Madrid, Construido en Junio de 2013 por Patrick Blanc	24
Figura 6. Representación del efecto isla de calor.....	27
Figura 7. Representación del movimiento de la tierra.	36
Figura 8. Comportamiento de energía radiante al incidir en un cuerpo opaco.	37
Figura 9. Límites de confort - grados horas por desconfort en frío y calor.....	44
Figura 10. Localización del área de estudio.....	47
Figura 11. Vista panorámica realizada con dron de las células experimentales	48
Figura 12. Crecimiento de la planta sobre tela metálica.	49
Figura 13. Vista de las fachadas verdes Oeste	49
Figura 14. Detalle Flor <i>Thunbergia grandiflora</i>	50
Figura 15. Detalle fachada vegetal.....	51
Figura 16. Perfil de cubierta ajardinada	51
Figura 17. Construcción de tejados verdes.....	52
Figura 18. Detalle de la hierba. Especie batatais, grama-forquilha.....	53
Figura 19. Planta sistema de riego por aspersion.....	55
Figura 20. Distribución de los termopares.	57
Figura 21. Análisis climático. Episodio del 7 al 12 julio 2015	61
Figura 22. Análisis climático. Episodio del 21 al 25 septiembre 2015	62
Figura 23. Temperatura del Bulbo Seco para el día crítico experimental de frío	64
Figura 24. Temperatura del Bulbo seco para el día crítico de calor. 24 de septiembre de 2015.....	64
Figura 25. Temperatura Superficial Interna de las fachadas Norte para el día crítico experimental de frío 10 de julio de 2015	70

Figura 26. Temperatura Superficial Interna de las fachadas Norte para el día crítico experimental de calor. 24 de septiembre de 2015.....	70
Figura 27. Temperatura Superficial de las Cubiertas para el día crítico experimental de frío (10 de julio de 2015)	73
Figura 28. Temperatura Superficial de las Cubiertas para el día crítico experimental de calor (24 de septiembre de 2015)	73
Figura 29. Esquema de ventilación cruzada en planta	76
Figura 30. Análisis climático. Episodio del 21 al 25 septiembre 2015.....	78
Figura 31. Evolución de las temperaturas internas del aire de las células de ensayo con ventilación.	80
Figura 32. Evolución de las temperaturas internas superficiales de las fachadas Norte de las células de ensayo con ventilación.	81
Figura 33. Evolución de las temperaturas internas superficiales de las fachadas Oeste de las células de ensayo con ventilación natural.	82
Figura 34. Evolución de las temperaturas internas superficiales de las cubiertas de las células de ensayo con ventilación natural.	84

LISTA DE TABLAS

Tabla 1- Sustancias contaminantes toxicas en ambientes interiores y plantas tropicales que consiguen eliminar esas toxinas y pueden utilizarse en fachadas verdes	32
Tabla 2- Resumen de tipos de células de ensayo utilizadas	46
Tabla 3 - Equipos de los que se compone el sistema de riego automático.....	54
Tabla 4 - Tabla resumen de amplitudes térmicas en las temperaturas internas del aire para el día de frío: 10 de julio de 2015	66
Tabla 5- Tabla resumen de amplitudes térmicas en las temperaturas internas del aire para el día de calor: 24 de Septiembre de 2015	66
Tabla 6- Grados-hora por desconfort para el día crítico experimental frío (°Ch)	68
Tabla 7 - Grados-horas de desconfort para el día crítico experimental frío (°Ch).	68
Tabla 8- Cuadro resumen de amplitudes térmicas en Fachadas Norte para día crítico experimental de calor (24 de septiembre de 2015)	71
Tabla 9- Cuadro resumen de amplitudes térmicas en Fachadas Norte para día crítico de frío (10 de julio de 2015)	71
Tabla 10- Resumen de las amplitudes térmicas en las temperaturas registradas en las cubiertas día crítico experimental de frio, 10 de julio de 2015	74
Tabla 11- Resumen de las amplitudes térmicas en las temperaturas registradas en las cubiertas día crítico experimental de calor, 24 de septiembre de 2015	74

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

CRHEA: *Centro de Recursos Hídricos y estudios ambiental*

ABNT: *Asociación Brasileña de Normas Técnicas*

ASHRAE: *American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers*

OWG: *American Wire Gauge*

CPTEC: *Centro de Previsión del Tiempo y Estudios Climáticos*

mPa: *Masa Polar Atlántica*

mTa: *Masa Tropical Atlántica*

TBS: *Temperatura del Bulbo Seco*

TSI: *Temperatura Superficial Interna*

CC: *Célula ensayo Control*

CFV: *Célula ensayo con Fachadas Verdes*

CCV: *Célula ensayo con Cubierta Verde*

CCV+FV: *Célula ensayo con Cubierta Verde + Fachadas Verdes*

LISTA DE SÍMBOLOS

Φ : Atraso térmico

ρ : Reflexión solar

c: Calor específico

d: Densidad absoluta

l: Espesor

Q: Cantidad de calor sensible

RS: Radiación total incidente en la superficie

α : Absorción solar

ΔT : Variación de temperatura

θ_s : Amplitud de temperatura del ambiente externo

λ : Conductividad térmica

μ : Amortiguación térmica

ω_s : Amplitud de temperatura superficial interna de un cerramiento

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	19
2.1. BREVE CONTEXTO HISTÓRICO	19
2.2. LAS CONSTRUCCIONES VERDES EN LA ACTUALIDAD.	20
2.2.1. Fachadas verdes. Definición y clasificación	21
2.2.2. Cubiertas ajardinadas: definición y tipos de cubiertas ajardinadas	25
2.3. BENEFICIOS DEL USO DE VEGETACIÓN EN AMBIENTES URBANOS, ASÍ COMO EN AMBIENTES INTERNOS.....	26
2.3.1. Beneficios a escala urbana	26
2.3.2. Reducción de la temperatura urbana. Una solución al efecto isla de calor	26
2.3.3. Mejora de la calidad del aire	29
2.4. BENEFICIOS DE LA VEGETACIÓN PARA AMBIENTES INTERNOS	29
2.4.1. Mejora condiciones térmicas internas del edificio	29
2.4.2. Mejora de la calidad del ambiente interior	31
2.4.3. Ruido y contaminación acústica.....	33
2.5. BENEFICIOS A ESCALA SOCIAL	33
2.5.1. Aspectos económicos, estéticos y beneficios psicológicos	33
2.6. BIOCLIMATOLOGIA.....	34
2.7. CONCEPTOS BIOCLIMÁTICOS.....	36
2.7.1. Comportamiento térmico en las edificaciones	36
2.7.1.1. Variables del clima.....	36
2.7.2. Formas de transmisión de calor. Intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente ...	39
2.7.3. Conceptos térmicos y definiciones: transmitancia térmica (U), amplitud térmica media (Δ), atraso térmico (φ) y conductividad térmica.	40
2.7.4. Inercia térmica.....	41
2.8. USO DE LA INERCIA TÉRMICA COMO HERRAMIENTA DE REFRIGERACIÓN PASIVO	42
2.9. CÁLCULO DE LOS LÍMITES DE CONFORT TÉRMICO	43
3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	45
4. MATERIAL Y MÉTODOS.....	45
4.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	47
4.2. SISTEMA CONSTRUCTIVO Y DESARROLLO DE LAS FACHADAS Y CUBIERTAS VERDES.....	48
4.3. SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO POR ASPERSIÓN	53
4.4. MEDICIONES AUTOMÁTICAS	56

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	59
5.1. ANÁLISIS CLIMÁTICO DE LOS DÍAS ESTUDIADOS. DÍA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE FRÍO (10 DE JULIO DE 2015 Y DÍA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE CALOR (24 DE SEPTIEMBRE DE 2015).....	59
5.2. ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO	62
5.2.1. Temperaturas internas del aire (TBS)	62
5.3. COMPORTAMIENTO TÉRMICO: TEMPERATURAS SUPERFICIALES INTERNAS (TSI) DE FACHADAS NORTE Y CUBIERTAS	69
5.4. EFECTO DE LA VENTILACIÓN NATURAL EN LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES INTERNAS EN UN DÍA CRÍTICO EXPERIMENTAL DE CALOR.....	75
5.4.1. Estudio de temperaturas internas del aire (TBS) con ventilación natural	79
5.4.2. Análisis del comportamiento térmico mediante estudio de Temperaturas superficiales Internas de las fachadas Norte.....	80
5.4.3. Análisis del comportamiento térmico mediante estudio de las Temperaturas Superficiales Internas de las fachadas Oeste.....	82
5.4.4. Análisis del comportamiento térmico mediante estudio de las Temperaturas Superficiales Interna de las cubiertas	83
6. CONCLUSIONES.....	85
REFERÊNCIAS.....	89
ANEXO A-COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS FACHADAS OESTE.....	97
ANEXO B - ANEXO FOTOGRÁFICO. SECUENCIA FOTOGRÁFICA DEL DESARROLLO DE LOSEXPERIMENTOS.....	101

1. INTRODUCCIÓN

Para minimizar los efectos perjudiciales, consecuencia de la actividad del hombre sobre el medioambiente, resulta imprescindible un cambio en el diseño de los edificios que tenga en cuenta la idea de sostenibilidad. Así surge el presente proyecto, desarrollado con el objetivo de llenar un vacío importante en el campo de la sostenibilidad y la eficiencia energética de los edificios, centrándose en la búsqueda de un diseño óptimo que consuma la menor cantidad de energía posible durante su vida útil y donde su función vaya más allá de la de una envolvente térmica. Se propone esta tesis de doctorado para analizar la respuesta térmica de cuatro células de ensayo con fachadas vegetales y cubiertas ajardinadas en un clima tropical, mostrando como resultados experimentales las temperaturas superficiales internas, así como la temperatura interna del aire para posteriormente hacer un estudio comparativo entre las células con y sin vegetación.

Una de las formas de regular los flujos energéticos en los edificios consiste en el uso de vegetación en las envolventes de los mismos, ya que de esta forma se logran reducir las pérdidas de calor en zonas de clima frío y el aumento ganancias de calor en zonas de climas cálidos. Además, se mitiga el impacto de la radiación solar y se aumenta la humedad relativa del edificio debido a la evapotranspiración de las plantas. Un edificio con envolventes vegetales se convierte en un elemento vivo dentro de la ciudad, que incrementa las zonas verdes, genera espacios que conectan ecosistemas y favorece a la fauna urbana.

El uso de vegetación en la edificación, que varía desde un simple césped hasta sofisticados jardines, como por ejemplo los jardines verticales hidropónicos de Patrick Blanc y puede ser una alternativa viable debido a las numerosas ventajas que ofrece no solo para el acondicionamiento térmico interior, sino también para el medio ambiente exterior. Estos beneficios radican en el proceso de evapotranspiración y fotosíntesis que las plantas realizan. Mediante la evapotranspiración se produce un aumento de la humedad ambiental y su consecuente reducción de temperatura, y a través de la fotosíntesis, las plantas son capaces de realizar una renovación del aire del entorno en el que se localizan. Todo esto, trae consigo una mejora del microclima de las ciudades actuales, caracterizadas por bajos porcentajes de áreas verdes y altos de contaminación.

Dentro de este contexto, la presente investigación buscó, primordialmente, medir las temperaturas internas, superficiales y del aire de cuatro células de ensayo, frente a las condiciones externas (temperatura externa del aire, radiación solar, humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección de los vientos), para posteriormente comparar y discutir el comportamiento de éstas en días denominados críticos experimentales, y así verificar la influencia de las variables climáticas en el interior de las mismas, con el fin de justificar los beneficios que los sistemas vegetales pueden ofrecer a los ambientes internos.

El criterio climático adoptado para definir los periodos de análisis de los datos se basa en los métodos de Climatología Dinámica, la cual incorpora dentro del estudio experimental el estado atmosférico dominante de las masas de aire de la región y su repercusión en el ambiente construido. El clima de Brasil se caracteriza por su intensa insolación en casi todas las estaciones del año, motivo por el cual, el uso de vegetación en la arquitectura, tanto en cubiertas como en fachadas, debe tenerse en cuenta a la hora de pensar en el acondicionamiento térmico de las edificaciones. El periodo de registro de datos para realizar este trabajo fue de un año, dentro del cual fueron seleccionados los episodios representativos del evento climático (VECCHIA, 1997), es decir, periodos críticos en relación a las sensaciones térmicas impuestas por las agitaciones del clima a la que una región puede estar sometida.

Observando los registros de las temperaturas del aire exterior y la incidencia de la radiación solar global, fueron considerados tres episodios representativos: uno en condiciones climáticas frías y otros dos en condiciones climáticas de calor. Una vez reunidos todos los datos de clima y de las temperaturas de los ambientes internos, se procedió al tratamiento de los datos con el fin de facilitar el análisis de los resultados. Así, mediante la realización de gráficos de los episodios considerados fue posible la comparación del comportamiento térmico de las cuatro células de ensayo anteriormente citadas.

De esta forma, el objetivo de este trabajo fue determinar si los sistemas constructivos utilizando fachadas y cubiertas con vegetación (combinados o no), influyen en las variables térmicas internas de las edificaciones ofreciendo mayor confort térmico y consecuentemente eficiencia térmica, en respuesta al calor o al frío (considerando un día crítico de calor durante la primavera y un día crítico de frío en invierno).

Por otro lado, y con el fin de conocer si la ventilación afecta a las temperaturas internas superficiales se realizó un análisis del comportamiento térmico con ventilación natural, en un día crítico experimental de calor.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Breve contexto histórico

Las existencias de numerosos registros históricos revelan que el uso de vegetación en edificaciones es una técnica constructiva muy antigua ya usada por los Zigurats de la antigua Mesopotamia (600 A.C.), actual sur de Irak y Babilonia, debido al rendimiento térmico que estos proporcionan. Un ejemplo de ello son Los jardines de Babilonia (Figura 1), localizados al Este del río Éufrates, en un antiguo barrio de la ciudad, entre los márgenes del río y los palacios reales. Fueron construidos durante el reinado de Nabucodonosor, que ordenó esa construcción con el fin de recrear una montaña artificial para encantar a su mujer, la cual había nacido y crecido en un lugar montañoso al Norte del país. En las escaleras de las pirámides, existían plantaciones de árboles y arbustos como protección de la radiación solar. Es uno de los primeros ejemplos de tentativa a construir jardines en espacios edificados por el hombre y una de las siete maravillas del mundo que cubría un área de 200m² con árboles, arbustos y trepaderas (DINSDALE; PEAREN; WILSON, 2006).

Figura 1. Ilustración representativa de los Jardines Suspendidos de Babilonia.



Fuente: Clayton e Price (1989).

Avanzando en el tiempo, durante el Imperio Romano, era una técnica habitual encontrar árboles en las cubiertas e inmediaciones de los edificios los cuales proyectaban sombra sobre los grandes edificios. También se han encontrado vestigios de esta técnica durante el período renacentista en Italia, pre-colombino en México, en India en los siglos XVI y XVII, en algunas ciudades de España y Francia en el siglo XVIII y en Escandinavia a partir del siglo XIX (ARAUJO, 2007).

El uso de cubiertas verdes ha sido una técnica común en países escandinavos durante muchos siglos, aunque la tendencia moderna comenzó en los años 50. Alemania fue pionera en investigaciones científicas sobre este tema, utilizados para conservación de agua y energía a través de este sistema constructivo. En los años 70 y tras una fuerte inversión del gobierno en este tipo de construcción, fueron introducidos nuevos materiales de drenaje, membranas impermeabilizantes y agentes antiraíces, entre otros. En los años 80, hubo un incremento de este tipo de construcciones de entre un 15 y un 20 %, llegando a 10 millones de metros cuadrados en los 1996 (PECK et al., 1999)

Actualmente las construcciones verdes ganan popularidad en varios países europeos. PECK et al.,1999 afirmó que Suiza, Holanda, Hungría, Suecia y el Reino Unido, fomentan el uso de la vegetación en edificaciones, así como la ciudad de Linz en Austria, la cual retribuye a los constructores proyecten esta metodología constructiva. En Suiza existe ya una ley federal sobre techos verdes y en Gran Bretaña a pesar de haber comenzado lentamente, las políticas sobre este tema han cobrado gran vigor, especialmente en Londres y Sheffield (DUNNETT; KINGSBURY, 2008a).

En la otra cara del mundo, en EEUU, durante 1998, el alcalde Richard M. Daley, destinó en Chicago fondos municipales al desarrollo de este tipo de proyectos, con el objetivo de luchar contra el calor que se concentra en las grandes ciudades, la iniciativa de dotar de vegetación las azoteas de los edificios se convirtió en una prioridad (SILVA, 2011).

2.2. Las construcciones verdes en la actualidad.

Durante décadas el ser humano ha tratado de estudiar los diferentes impactos ambientales que él mismo ha causado sobre el planeta debido a la cantidad de residuos generados con el desarrollo de sus actividades (VEGARA, 2008). Vivimos una época en la que el consumo de energía repercute directamente sobre el medio ambiente, por lo que se requiere un uso eficiente y racional, no solo para lograr un ahorro económico, sino también para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lo que implicaría, un aumento en la calidad del ambiente externo (RIOS, 2011).

Existen trabajos sobre cubiertas ajardinadas (MANSO; CASTRO-GOMEZ, 2015) y algunos, aunque no tantos, de sistemas vegetales verticales (HUNTER et al., 2014). Sin embargo, en el periodo de búsqueda de aproximadamente ocho años, no ha sido hallado ninguno que contenga una combinación de ambos. Según Hunter et al. (2014), que realizó una revisión crítica sobre el uso de vegetación en las fachadas, la mayoría de los trabajos realizados únicamente contemplan problemas de diseño y no existen evidencias suficientes sobre parámetros climáticos, necesarios para realizar una comparación entre las diferentes variedades de sistemas verticales. Además, en dicha revisión bibliográfica se han encontrado pocos trabajos sobre balance de energía con plantas trepadoras.

2.2.1. Fachadas verdes. Definición y clasificación

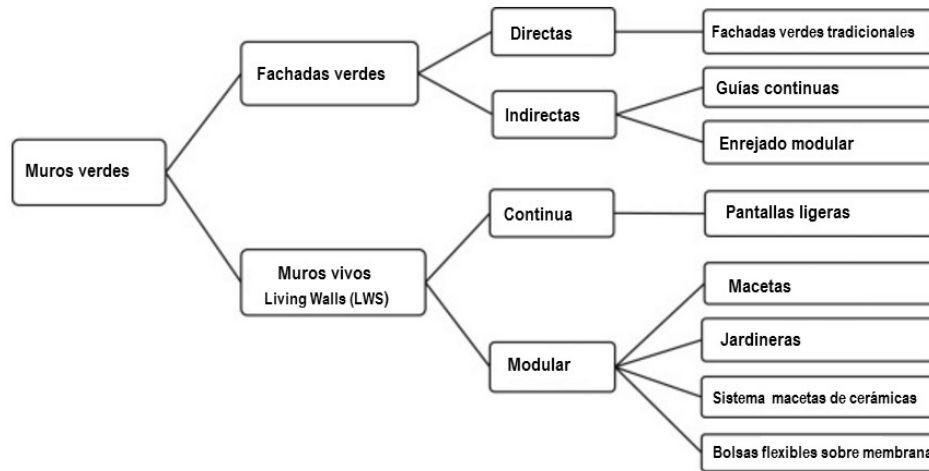
Se entiende por fachada verde una instalación vertical cubierta de plantas de diversas especies cultivadas sobre una estructura dando la apariencia de jardín vertical, de ahí que también se le conozca por ese nombre. Estos modelos de fachadas pretenden que, en el ambiente interior, se consiga una máxima eficiencia y conservación de la energía, lo que conlleva un uso racional de los recursos naturales. La construcción verde busca crear estructuras y usa sistemas que son ambientalmente responsables (VILLA, 2009).

Existen varias nomenclaturas para referirse a los diferentes sistemas verticales vegetales. El botánico francés Patrick Blanc pionero en este tipo de instalación, los denomina jardines verticales, Peck (1999) usa el concepto de sistemas verdes verticales, sin embargo, Pérez (2010) habla de ellos como sistemas de plantación vertical cuyas siglas en inglés son VGS (Vertical Greenery System). Otro concepto actual que ha surgido con el uso de vegetación en la arquitectura, es el de Biofachada (biowall) utilizado por Francis y Lorimer (2011), los cuales realizaron trabajos en paredes interiores con el fin de mejorar la calidad de los ambientes.

La vegetación apropiada para este tipo de construcciones depende de las condiciones climáticas locales, las características del edificio y las condiciones del entorno en el que se inserta la pared verde. Las plantas trepadoras se consideran una solución económica. Estas especies contienen dos tipos principales de hojas, perennes o caducas. Las plantas de hoja perenne mantienen sus hojas todo el año y las de hoja caduca pierden sus hojas durante el otoño (KISSMANN, 1997). Por lo tanto, una fachada verde de plantas de hoja caduca no solo implica un fuerte cambio visual a lo largo del año, sino que también afectará al comportamiento térmico del edificio en el que esté instalada. Normalmente son utilizadas plantas de hoja caduca en lugares con inviernos fríos, de esta forma, con la ausencia de vegetación durante dicha estación, se permite la incidencia directa del sol sobre la fachada lo que implicará un aumento de la temperatura interna (PÉREZ, 2011a).

La figura 2 muestra los diferentes tipos de sistemas vegetales verticales que actualmente existen y realiza una distinción entre fachadas verdes y muros vivos.

Figura 2. Clasificación de las fachadas verdes



Fuente: Adaptado de Manso y Castro-Gómez (2015).

La diferencia principal entre las fachadas y los muros verdes reside, según Kohler (2008), en que en las primeras las plantas crecen directamente sobre la pared, mientras que los segundos se usan tecnologías y materiales de soporte para dicha técnica.

- **Fachadas verdes:**

Las fachadas verdes se basan en la aplicación de plantas trepadoras o colgantes a lo largo de la pared. Las plantas pueden crecer hacia arriba de la superficie vertical, como por ejemplo las llamadas tradicionales, o crecer hacia abajo de la superficie vertical, en cuyo caso cuelgan desde una altura determinada (DUNNETT; KINGSBURY, 2008b). Las fachadas verdes son clasificadas como directas o indirectas. En las primeras, las plantas están conectadas directamente a la pared (Figura 3), mientras que en las segundas se incluye una estructura de soporte para la vegetación. Las Fachadas verdes tradicionales se consideran un sistema directo y consisten en el uso de estructuras de soporte para la planta, estando éstas arraigadas directamente al suelo (LAURENZ et al., 2005). (Figura 4).

Figura 3. Detalle de crecimiento de Fachada verde directa, casa privada, Golegã, Portugal.



Fuente: Manso y Castro-Gomez (2015).

Figura 4. Detalle de construcción de fachada verde indirecta.



Fuente: La autora (2015)

- **Muros vivos:**

Los muros vivos son sistemas vegetales que permiten la integración de plantas en edificios altos y grandes superficies, mediante el crecimiento uniforme a lo largo de toda la superficie vertical. Estos

sistemas llegan a zonas más altas que los anteriores y pueden ser adaptados a todo tipo de edificios, además permiten la integración de una amplia variedad de especies (CORRADI, 2009).

Los sistemas de muros vivos (LWS (siglas en inglés): Living Wall Systems) se clasifican, dependiendo del método de aplicación, en continuos o modulares. Los LWS continuos se basan en la aplicación de pantallas ligeras y permeables en las cuales las plantas se insertan individualmente, mientras que en LWS modulares se usan recipientes de una dimensión específica en donde se coloca el sustrato necesario para que las plantas puedan crecer. Cada recipiente es soportado por una estructura complementaria o fijado directamente en la superficie vertical (CORRADI, 2009).

Los muros vivos continuos son también conocidos como jardines verticales, un nombre dado por el botánico francés Patrick Blanc que difundió la aplicación de este tipo de sistema (hidropónico) por todo mundo. Su obra está presente en varios edificios de los arquitectos más famosos (ver Fig. 5).

Figura 5. Sistema de muro vivo continuo, Caixa Forum, Madrid, Construido en junio de 2013 por Patrick Blanc



Fuente: La autora (2016).

Existen diferentes tipos de muros vivos modulares, como por ejemplo las macetas y las jardineras. Las macetas son normalmente recipientes rígidos, acoplables entre sí, capaces de contener las plantas y el peso del sustrato, a diferencia de las jardineras que son una adaptación de las anteriores con la peculiaridad de que son fijadas a una estructura vertical de soporte. Otro ejemplo son las macetas cerámicas, que se caracterizan por ser elementos modulares de revestimiento exterior o interior de los edificios. Concretamente, más que una capa de vegetación, estas macetas son un revestimiento modular con inserciones para las plantas. Por último, están las bolsas flexibles sobre membranas,

construidas con materiales ligeros que permiten el cultivo de la vegetación dentro de las mismas (MANSO; CASTRO-GOMEZ, 2015).

2.2.2. Cubiertas ajardinadas: definición y tipos de cubiertas ajardinadas

Se denomina cubierta ajardinada a toda superficie exterior de la cubierta preparada para acoger vegetación. Este tipo de construcciones tienen su origen en Alemania durante 1957, y su pionero, Walter Zink, fundó la empresa llamada ZinCo, la cual actualmente es líder a nivel mundial en cubiertas verdes extensivas e intensivas. En general, las cubiertas ajardinadas están formadas por cinco componentes principales: una membrana antiraiz, una membrana impermeable, una capa drenante, material geotextil, el suelo y las plantas (TEEMUSK; MANDER, 2009).

Sun et al. (2013) las clasifica en extensivas o intensivas, en función de la profundidad de la capa de sustrato, del tipo de vegetación y de los materiales de construcción utilizados.

La *cubierta verde intensiva* es un jardín en la azotea cuya capa de sustrato posee una profundidad de al menos 15 cm de profundidad (DUNNET; KINGSBURY, 2008a, p.5).y normalmente cuenta con una pendiente inferior a 10°. Son capaces de soportar una mayor estructura vegetal, por lo que requieren un refuerzo estructural adicional. La ventaja principal de este sistema de cubiertas es la creación de un entorno natural que conlleva una mejora de la biodiversidad del entorno (CHEN; PEI; SHIAU, 2015; ROWE, 2011).

La *cubierta ajardinada extensiva* no requiere un proceso de construcción técnicamente difícil. El tipo de vegetación normalmente utilizado es en su mayoría autóctona, es decir, plantas resistentes y fácilmente adaptables al lugar, ya que las cubiertas están expuestas a fuertes vientos, heladas y/o radiación solar directa, especialmente en la época estival (ZINCO, 2016). Es el sistema apropiado para grandes tejados o tejados inclinados y posee una profundidad de sustrato de al menos de entre 2 y 15 cm, una de las razones por las que su costo de instalación también es menor (DUNNET; KINGSBURY, 2008b, p.4). La principal ventaja de los sistemas de cubiertas es que además de ser más económicas (MENTENS; RAES; HERMY, 2006), no precisan mucho mantenimiento, pudiendo limitarse éste a dos o tres visitas de control al año (DUNNET; KINGSBURY, 2008b; ZINCO, 2016).

Según Dunnet y Kingsbury (2008b), clasificar las cubiertas en solo dos grupos (anteriormente descritos) es demasiado restrictivo, ya que puede existir una combinación de ambas. Por esta razón surge la denominada-*cubierta semi-extensiva*. La característica principal de este tipo de tejados es que admite diversos tipos de vegetación, desde arbustos pequeños a plantas aromáticas junto con otras de la familia utilizadas en la extensiva. Esta modalidad de cubierta cumple los mismos requisitos que la extensiva, con la diferencia de que la profundidad del sustrato debe estar entre 10 y 20 cm.

Los beneficios de este tipo de arquitectura son varios, destacando entre ellos la mitigación de la escorrentía, así como la transformación de la calidad del agua de la misma. Con respecto a este aspecto, el sistema intensivo funciona mejor que el extensivo. Van Renterghem y Botteldooren (2009)

hicieron una comparación de ambos tipos de construcción con los tejados convencionales y concluyeron que los tejados verdes intensivos disminuyen la escorrentía en un 85%, mientras que los extensivos lo hacen en un 60%. Además, las cantidades de plomo, zinc, cadmio y cobre, y la contaminación en las cubiertas verdes intensivas son significativamente menores que en los extensivos.

2.3. Beneficios del uso de vegetación en ambientes urbanos, así como en ambientes internos

Existen numerosos beneficios ambientales tanto en las fachadas como en los tejados verdes y entre ellos destacan los siguientes: reducción de isla de calor urbano, mitigación de la demanda de energía para la calefacción y la refrigeración, reducción y retraso de la escorrentía de aguas pluviales (en el caso de cubiertas ajardinadas es más acentuado que en el caso de fachadas verdes), mejora en la calidad del aire, reinstauración de zonas verdes, mejora de la biodiversidad, provisión de espacios recreativos y agrícolas, y aislamiento del edificio tanto térmico como acústico (ROWE, 2011; SHEWEKA; MAGDY, 2011). A continuación, se detallan algunas de estas características.

2.3.1. Beneficios a escala urbana

2.3.2. Reducción de la temperatura urbana. Una solución al efecto isla de calor

Con el aumento de la población y de la ocupación territorial de los centros urbanos, se han producido impactos ambientales negativos principalmente debidos a la concentración masiva de edificios, responsable de la impermeabilización de suelo, la reducción de los espacios verdes y un aumento de la contaminación del ambiente urbano. Todo esto conlleva un cambio del comportamiento térmico a escala microclimática y genera el efecto conocido como Isla de Calor. Wilmers (1990), afirma que la vegetación puede desempeñar un papel importante en el topoclima de las ciudades y el microclima de los edificios, además podrían lograrse cambios climáticos mediante el uso de vegetación en diferentes combinaciones, en cubiertas, paredes y espacios libres en las proximidades de los edificios.

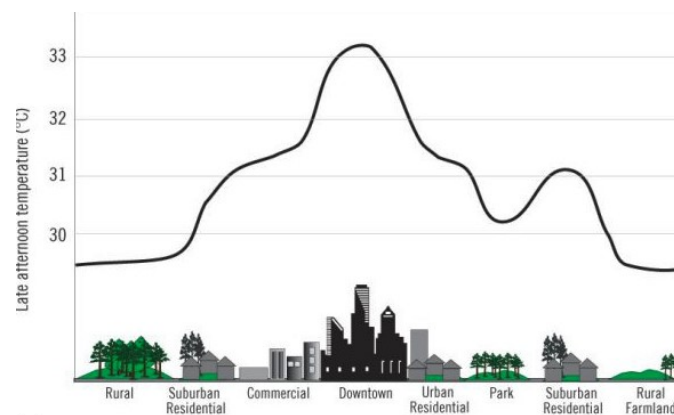
El control de las condiciones microclimáticas urbanas es fundamental tanto para la eficiencia energética como para la reducción de emisiones, de forma que puedan ser garantizados espacios confortables para los habitantes de las zonas urbanas, así como en el interior de sus viviendas.

La distribución de la temperatura en las áreas urbanas está afectada por el balance de la radiación solar que incide en las superficies y es absorbida y transformada en calor sensible. Techos, fachadas de

edificios, calles, plazas, etc., representan una importante masa de acumulación de calor, volviendo a remitirlo al ambiente en forma de radiación de onda larga y con un desfase de tiempo, dando lugar a lo que se conoce como Efecto isla de calor. La intensidad de dicho efecto depende de la porción de superficie visible al cielo, de los materiales, la emisividad, la inercia térmica, etc. Las zonas edificadas ofrecen más superficie para la absorción de calor, que posteriormente será irradiada lentamente durante la noche (GRUJIC, 2011).

A medida que se desarrollan las áreas urbanas, se producen cambios en el paisaje. Los edificios, carreteras y otras obras de infraestructuras sustituyen las zonas verdes. Las superficies que antes eran permeables y húmedas, ahora se vuelven impermeables y secas. Estos cambios hacen que las regiones urbanas sufran más calentamiento que el entorno rural, formando una "isla" de temperaturas más altas. Las islas de calor se producen en la superficie y en la atmósfera. El sol calienta las superficies urbanas secas expuestas alcanzando éstas temperaturas de 27-50°C, valores más altos que los de la temperatura del aire, mientras que las superficies sombreadas o húmedas, en su mayoría en el entorno rural, permanecen más próximos a la temperatura del aire (ARRAU; PEÑA, 2015). La Figura 6 muestra la diferencia de temperaturas entre las zonas urbanizadas y las arborizadas o rurales.

Figura 6. Representación del efecto isla de calor



Fuente: Arrau e Peña (2015).

El uso de espacios verdes y plantación de árboles son la primera y más efectiva medida a poner en marcha para reducir los efectos de la isla de calor urbana. La vegetación posee la capacidad de reducir la temperatura diaria de los edificios hasta en un 5% solo con el sombreado de sus fachadas, ya que la energía incidente puede ser transformada de calor latente a calor sensible, fenómeno denominado enfriamiento por evapotranspiración, lo que ayudaría a disminuir los efectos de la isla de calor (SHEWEKA; MAGDY 2011).

Asimismo, los espacios verdes dentro de las ciudades son considerados indicadores de calidad ambiental. El uso de vegetación en cubiertas y fachadas es una técnica que presenta un impacto positivo en el clima urbano debido a la capacidad de las plantas de crear zonas de sombra, absorber

parte de la radiación incidente y favorecer la infiltración del agua de lluvia, aumentando automáticamente la humedad relativa del aire, factores estos que ayudan a disminuir la Isla de Calor (WILMERS, 1990).

Con el fin de determinar el efecto térmico que tiene el uso de vegetación en las envolventes de los edificios sobre el microclima, Alexandri y Jones (2008), realizaron un trabajo en nueve ciudades con distintos tipos de clima, y los mejores resultados fueron obtenidos en la ciudad con clima seco y cálido, para la cual se demostró que la vegetación puede ser un importante método para la reducción de las temperaturas urbanas. La temperatura del aire disminuyó al nivel de los techos hasta 12,8°C la media diaria, mientras que en el interior del cañón la temperatura máxima se redujo 11,3°C y la temperatura media diaria 9,1°C. Todo esto, implica una reducción de la temperatura del aire que directamente influirá en la temperatura interna de los edificios y a su vez en el consumo de energía (SANTAMOURIS, 2001).

El resultado obtenido en ciudades de climas húmedos fue un descenso de la temperatura máxima de 8,4°C, usando la vegetación tanto en paredes como en techos. Además, para velocidades bajas del aire en el interior del cañón, la dirección del viento no tiene ningún efecto significativo en la temperatura, afirmando Alexandri y Jones (2008) que dicha disminución de temperatura es debida a la vegetación. Cabe destacar, que, para todos los climas examinados, las paredes verdes tienen mayor efecto que los techos verdes en el interior del cañón. No obstante, las cubiertas verdes tienen unos mejores resultados a niveles de los tejados y, en consecuencia, a escala urbana. La combinación de ambos, cubiertas verdes y paredes verdes, conduce a una mayor atenuación de las temperaturas del interior del cañón. Estos resultados han sido obtenidos tras el estudio de pequeñas áreas urbanas, por lo que si se aplicase a escala de toda la ciudad, el efecto isla de calor podría ser mitigado, y con ello, se lograría un ahorro energético del 32% al 100% en la refrigeración de los edificios (ALEXANDRI; JONES, 2008).

El efecto de las cubiertas verdes y su repercusión sobre el fenómeno isla de calor urbano también fue estudiado en la ciudad de Toronto. La investigación concluye que el uso de tejados ajardinados, reduce la temperatura ambiente entre 0,5°C y 2°C. Además, se realizó una estimación sobre la reducción de la demanda de energía eléctrica infiriendo que el ahorro por refrigeración para la ciudad, sería de \$12 millones, equivalente a 2,37 kWh/ m²/año. En estos cálculos se consideró la reducción de la temperatura a través de los techos y fachadas de los edificios. Este estudio estimó que como consecuencia de la reducción de las necesidades de energía, se disminuirían las emisiones de dióxido de carbono de las centrales eléctricas alrededor de 32.200 Toneladas/año (BANTING et al., 2005).

Wong et al. (2009), realizó un estudio en Singapur, ciudad calurosa y cuyo ritmo de calentamiento va en aumento en las dos últimas décadas. Este autor reconoce que, debido al efecto de isla de calor urbano, ha aumentado la demanda de aire acondicionado y, por consiguiente, de energía. Para solventar este problema, propone como una de las medidas a tomar para lograr una reducción de la

temperatura ambiente, aumentar la cantidad de zonas verdes en la ciudad, incluyendo jardines en las azoteas, así como el uso de sistemas de zonas verdes verticales en edificios.

2.3.3. Mejora de la calidad del aire

La vegetación es una herramienta capaz de favorecer la reducción de los efectos negativos que la contaminación produce. La contaminación del aire es una amenaza, no solo para el ambiente, sino también para la salud de los habitantes de las ciudades. Los problemas de salud, enfermedades respiratorias y cardíacas entre otras, causados por la contaminación urbana pueden variar según la duración de la exposición, la cuantía, la edad, la susceptibilidad de cada persona, etc. En la actualidad se ha observado un incremento de la contaminación asociada al aumento de la urbanización, del consumo y la industrialización (KORC, 2010).

Baker y Brooks (1989) destacan la capacidad de las plantas para limpiar el aire, ya que la vegetación es capaz de captar gases contaminantes mediante sus estomas e interceptar partículas en sus hojas, acabando de esta forma con algunos compuestos orgánicos como hidrocarburos poliaromáticos, tanto en sus tejidos como en el sustrato (AKBARI; POMERANTZ; TAHA, 2001). A pesar de esto, se ha demostrado que los árboles pueden proporcionar una reducción de los contaminantes del aire en las zonas urbanas (PAPADAKIS; TSAMIS; KYRITSIS, 2001).

Se calcula que una hectárea de vegetación puede absorber 7.500 kg de CO₂ por año (PORTILLA, 2013). Por estas razones es importante crear espacios dentro de las ciudades para plantar árboles o establecer zonas verdes urbanas, para lo cual pueden ser utilizados tanto las azoteas como las fachadas de las edificaciones que forman el tejido urbano.

2.4. Beneficios de la vegetación para ambientes internos

2.4.1. Mejora condiciones térmicas internas del edificio

La paulatina preocupación de la sociedad por los problemas ambientales, ha provocado un mayor interés por el uso de una arquitectura más sostenible que mejore las condiciones ambientales, favoreciendo las condiciones térmicas internas del edificio. Según Dunnett y Kingsbury (2008 a), el uso de vegetación es una técnica que ha sido utilizada desde hace siglos en todo el mundo con el fin de mejorar el confort térmico de los edificios. Esta es una de las razones por la cual la técnica está siendo aceptada con gran interés en la actualidad, además de por los beneficios medioambientales que ofrece, por la mejora del confort térmico interno y de la eficiencia energética de los edificios.

Los edificios construidos con materiales de construcción convencionales y expuestos a radiación solar absorben el calor que, avanzando por las fachadas, eleva la temperatura interna. Como consecuencia de este aumento de temperatura dentro del edificio, los ocupantes sienten la necesidad de activar el aire acondicionado para conseguir una temperatura confortable y poder realizar las actividades cotidianas, produciendo un incremento de consumo de energía. Según Dunnett y Kingsbury (2008b), con el uso de vegetación en fachadas y/o tejados la temperatura del aire puede disminuir en 0,5°C, lo que conllevaría un ahorro de electricidad por reducción de uso de aire acondicionado de un 8%.

La incorporación de jardines tanto en fachadas como en cubiertas, produce inmediatamente sobre el edificio una zona de sombra que es capaz de reducir entre un 50% y un 70% la energía necesaria para climatizar ambientes interiores, ya que por sus características son capaces de reducir la temperatura exterior de la fachada en 5,5°C debido a que la incidencia del sol ya no es directa. Por tanto, se confirma que la implantación de jardines verticales en las ciudades, en cualquiera de sus modalidades, producen una notable mejoría del confort térmico (PECK et al., 1999).

Varios autores confirman que el uso de vegetación en las envolventes de los edificios afecta principalmente a tres aspectos. En primer lugar, obstaculizan y absorben la radiación incidente sobre ellas (sombreado), en segundo lugar, otorgan refrigeración por evapotranspiración, aumentando el albedo y reflejando la radiación solar incidente y en último lugar actúan como aislante térmico (HOLM, 1989; MCPHERSON, 1994; OKE, 1988; TAHA, 1997).

Asimismo, y según afirma Pérez et al. (2011a; 2011b), la vegetación reduce la transferencia de calor por la envolvente del edificio, lo que conlleva a una reducción de la demanda de energía para refrigeración de los ambientes. Dunnet y Kingbury (2008 a) cuantifican esa reducción de hasta un 50%, ya que a través de la evapotranspiración la radiación solar se convierte en calor latente que provoca que la temperatura no aumente. Además, según contempla el Ministerio de Economía de Baden-Württemberg (2008) en su trabajo, *Climate booklet for urban development*, una fachada cubierta totalmente por vegetación está protegida de la intensa radiación solar del verano y refleja o absorbe entre un 40% y un 80% de la radiación recibida, dependiendo de la cantidad y del tipo de vegetación.

Pesquisas dirigidas al estudio del efecto de sombra sobre las envolventes de los edificios, demuestran que las superficies expuestas directamente al sol, elevan la temperatura interna, debido al avance de la energía absorbida hacia el interior y como consecuencia se activan los aires acondicionados para adecuar térmicamente el ambiente, lo que aumenta el consumo de energía (PAPADAKIS; TSAMIS; KYRITSIS, 2001).

Según Bass y Baskaran (2003) en un trabajo realizado con vegetación en cubiertas, afirman la reducción en el consumo de energía de aproximadamente 23% en el uso de equipos de aire acondicionado y un 20% en el de ventiladores, lo que resulta una reducción anual del 8% en la factura de energía.

En su tesis “Climatología aplicada a la arquitectura”, Seixas (2015) estudió en periodos de frío y calor dos células de ensayo (con y sin cubierta verde). En este trabajo buscó la mejor distribución interna de termopares para medición de temperaturas en ambientes internos, cuyos resultados desvelan en el análisis de TBS y termopares colocados a diferentes alturas, que ambas células, con y sin cubierta verde, presentan temperaturas de aire idénticas tanto en el periodo de frío como en el de calor.

Perussi (2016), analizó el comportamiento térmico de un sistema de cubierta verde instalada sobre plataformas de ensayo (una con vegetación y otra solo con sustrato) a través de los datos de temperaturas superficiales en las diferentes capas del sustrato. En este trabajo se concluyó que, en los días seleccionados como referencia, el retraso térmico fue mayor en la plataforma que presentaba vegetación, y la amplitud térmica registrada en la misma plataforma fue menor. De esta forma, se concluye que, debido al bloqueo de una parte de la radiación solar por la vegetación, se impiden ganancias de energía térmica, así como que parte de esta energía sea perdida para el ambiente.

Asimismo, Peck et al. (1999) ratifica que la incorporación de jardines verticales en un edificio, produce inmediatamente sobre él una zona de sombreado, capaz de reducir en un 50-70% la energía necesaria para climatizar ambientes interiores ya que, por sus características, es capaz de reducir la temperatura exterior de la fachada en 5,5°C, debido a que la incidencia del sol ya no es directa. Esto conlleva una gran reducción de consumo anual de energía. Por tanto, la implantación de jardines verticales en nuestras ciudades, en cualquiera de sus modalidades, producen una notable mejoría del confort térmico, así como una reducción en la demanda de acondicionar los interiores.













El uso de fachadas verdes con trepaderas es capaz de reducir la temperatura interna de los edificios debido al sombreado que produce en el mismo. Además, en invierno, este sistema protege del frío y del viento. Por tanto, se puede afirmar que la construcción sostenible es la arquitectura del futuro, una arquitectura más cercana al entorno, que use la vegetación como componente esencial para definir la arquitectura integradora y del siglo XXI, posibilitando el control y la regulación de flujos energéticos, además de reflejar valores y mentalidad del nuevo diseño (ACOSTA, 2011).

2.4.2. Mejora de la calidad del ambiente interior

Los seres humanos pasan el 85% del tiempo en espacios interiores, por esa razón es de gran importancia la calidad del ambiente interior. Altos niveles de temperatura y humedad pueden incrementar concentraciones de ciertos contaminantes, así como una inadecuada ventilación. Las personas que trabajan y viven en ambientes artificiales pueden inhalar diariamente más de 300 contaminantes, entre los que destacan productos químicos como formaldehído y monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, benceno, tolueno y xileno entre otros, capaces de crear reacciones, como por ejemplo, irritación de ojos, de nariz o garganta, dolor de cabeza, mareos, fatiga, efectos inmediatos y tratables (WOLVERTON; DOUGLAS; BOUNDS, 1989).

Una de las soluciones a estos problemas, la yace en las construcciones verdes, diseñadas para reducir el impacto general de la polución sobre la salud humana, ya que existen ciertas especies de plantas capaces de captar y eliminar contaminantes en interiores, como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1 - Sustancias contaminantes tóxicas en ambientes interiores y plantas tropicales que consiguen eliminar esas toxinas y pueden utilizarse en fachadas verdes

Sustancias contaminantes	Especies	Plantas
Xileno (C ₈ H ₆), Benceno (C ₆ H ₆), Tolueno (C ₇ H ₈).	<i>Nephrolepis obliterata</i> (Nombre común: Helecho kimberly Quiin)	
	<i>Phalenopsis sp.</i> (Nombre común: Orquidea sp.)	
Compuestos orgánicos volátiles	<i>Scindapsus aureus</i> (Nombre común: Poto de oro)	
	<i>Philodendron sp.</i>	
	<i>Aureum Epipremnum</i>	
Formaldehído (CH ₂ O)	<i>Spathiphyllum sp.</i> (Nombre común: Lirio de la paz)	
Monóxido de carbono	<i>Chlorophytum Comosum</i> (Nombre común: Plata de la araña)	
	<i>Dracaena "Janet Craig"</i> (Nombre común: Dracaena deremensis "Janet Craig")	
	<i>Ficus sp.</i>	
Traidoroetileno	<i>Sansevieria trifasciata "Laurentii"</i> (Nombre común: Lengua de suegra)	
	<i>Morifolium Chrysanthemum</i> (Nombre común: Crisantemo)	
	<i>Dracaena Sp.</i>	

Fuente: Adaptada de Wolverton, Douglas e Bounds (1989)

2.4.3. Ruido y contaminación acústica

Después de varias décadas de rápido crecimiento urbano y superpoblación, cada vez quedan menos terrenos disponibles destinados a zonas verdes, e incluso terrenos para la propia urbanización. Dicha escasez conlleva a que cada vez con más frecuencia, se construyan cerca de las vías de acceso a las ciudades: autopistas, aeropuertos, zonas industriales, terminales de autobuses, etc. De este modo, los habitantes de las zonas urbanas están expuestos a una contaminación acústica grave que puede desarrollar problemas de salud importantes, como pérdida de audición, hipertensión, distorsión de sueño, así como disminución del rendimiento escolar. Se sabe que más del 44% de la población en la Unión Europea se expuso a niveles de ruido por encima de 55 dB en el año 2000 (WONG et al., 2010).

La propiedad acústica de la vegetación es la capacidad de reducir ruidos de fondo desagradables con otros más agradables para el oído humano, como son entre otros el sonido de las hojas y las ramas en movimiento (OCHOA, 1999). Existen estudios que acreditan que las hojas de las plantas atenúan el sonido y ayudan a rechazar el eco de los edificios y a amortiguar los sonidos fuertes de las ciudades actuales. El sonido que llega a las hojas es amortiguado mediante reflexión, refracción y absorción de la energía acústica, de forma que parte de la energía que llega a las hojas las hace vibrar y la otra parte es reflejada y difractada alrededor de la hoja. Se cree que la reducción del ruido es proporcional al número de plantas cultivadas (MARTENS; MICHELSEN, 1981).

La investigación sobre la actuación acústica de la vegetación es limitada y casi inexistente, sin embargo, las propiedades de la vegetación para la reducción del ruido han sido ampliamente investigadas. En los últimos años, la investigación se ha centrado en los tejados verdes, haciendo una comparación de la pérdida de transmisión entre un techo con y sin jardín, pudiendo deducir que el uso vegetación en los edificios genera una reducción de ruido de entre 5-20dB (WONG et al., 2010).

2.5. Beneficios a escala social

2.5.1. Aspectos económicos, estéticos y beneficios psicológicos

La mayoría de los beneficios económicos que aportan las construcciones verdes están asociados con los beneficios ambientales. Uno de los beneficios del uso de cubiertas ajardinadas es recoger agua de la lluvia. Esto conlleva una reducción del precio de instalaciones en infraestructura para el drenaje. Además, introducir plantas en las fachadas de los edificios mejora los desperfectos de las mismas causados por efectos del paso del tiempo, además de reducir costes de mantenimiento.

Desde el punto de vista del valor de los edificios, estos pueden adquirir un valor económico adicional gracias a la mejora estética que la introducción de plantas ofrece, no solo a la vivienda, sino a la zona urbana. Es decir, la vegetación genera alivio y contraste con el entorno altamente urbanizado en el que vivimos dentro de las ciudades, además de dar ocasión a los habitantes de tener más contacto con la naturaleza.

Estudios científicos realizados por la *Washington State University*, afirman que el hecho de tener plantas a la vista, dentro del entorno de trabajo, produce respuestas fisiológicas positivas sobre la presión sanguínea y el control de las emociones. Este estudio demostró que el añadir plantas a un espacio interior, influye la productividad de las personas que lo ocupan, ya que, según esta investigación, el 12% de usuarios son más rápidos respecto al tiempo de reacción, así como en la sensación de estrés. Asimismo, los usuarios en la habitación con plantas dijeron sentirse más concentrados que las personas que ocupaban la habitación sin plantas (LOHR; PEARSON MIMS; GOODWIN, 1996)

Las plantas pueden cumplir varias funciones, proporcionan espacios de recreo y disfrute, aislamiento, paisaje para la vida urbana, así como mejoras estéticas, paisajísticas, etc. Se ha probado que el contacto visual y físico con las plantas puede resultar beneficioso para la salud, ya que es capaz de disminuir estrés, mejora la recuperación de pacientes y dota a las personas de mayor resistencia ante contagio de enfermedades (SHEWEKA; MAGDY 2011).

2.6. Bioclimatología

La bioclimatología estudia las relaciones entre el clima y el ser humano con el fin de crear una arquitectura adecuada al clima local, es decir, una arquitectura con un desempeño térmico adecuado (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2005). Olgyay (1998) estableció una forma de proyecto bioclimático que adapta la arquitectura al clima local.

La clasificación de las escalas del clima varía según el autor, pero en general se dividen en macroclima o mesoclima y microclima. Dentro del mesoclima son observadas las características climáticas de una región y normalmente son medidas en estaciones meteorológicas. Una gran ciudad puede alterar las condiciones del mesoclima mediante la contaminación que genera o por la disminución indiscriminada de vegetación y corte árboles. Sin embargo, en el microclima, son consideradas las alteraciones locales de la radiación solar, temperatura del aire, humedad y viento. Además, está directamente relacionado a la escala del edificio y de su entorno inmediato, siendo este influenciado por las consecuencias de las escalas climáticas y también por la interferencia directa con las propiedades colindantes (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2005).

La humedad relativa, la temperatura del aire, la temperatura radiante y el movimiento del aire influyen en la sensación térmica de los seres humanos, ya que es un ser homeotermo, es decir, mantiene su temperatura corporal en un valor cercano a 37°C y es prácticamente constante. Además,

posee un mecanismo de termorregulación, lo que le permite adaptarse a las variaciones climáticas. Esta termorregulación, a pesar de ser una forma natural para el control de ganancias y pérdidas de calor por el organismo, implica un esfuerzo extra y consecuentemente disminuye el rendimiento humano (RUAS, 2002).

Las condiciones climáticas que pueden considerarse satisfactorias, según los parámetros bioclimáticos de confort ambiental, son por lo general infrecuentes, aunque es posible construir espacios más acondicionados con las necesidades físicas y psicológicas que las lleva dentro de la zona de confort, con bajo costo de manutención, así como reduciendo el acondicionamiento térmico artificial. Esos requisitos que hacen a los seres humanos percibir una sensación agradable, que es lo que conocemos como “zona de confort”, la cual ha sido determinada por las necesidades del hombre para mantener su equilibrio higrotérmico (FREITAS, 2005).

La American Society of Heating Refrigerating and air-conditioning Engineers (ASHRAE, 1992) define confort térmico como: “un estado de espíritu que refleja satisfacción con el ambiente térmico que rodea a la persona”, por lo que, condiciones fisiológicas y psicológicas están implicadas en este concepto, que dependen individualmente de cada persona. De modo que, el punto de partida para el conocimiento de este concepto es la definición de los modelos de confort térmico, los cuales forman el esqueleto teórico de las variables que envuelve dicho criterio. Así, para cuantificar el comportamiento humano frente a un ambiente térmico, son definidos índices que expresan esta relación causa efecto, con la utilización de valores numéricos representativos del fenómeno (BOGO et al., 1994)

Scarazzatto (1988) agrupa estos índices en tres grupos. En primer lugar, aquellos que miden el desgaste físico o esfuerzo que el individuo emplea en determinadas condiciones de trabajo, llamados Índices termométricos o fisiológicos, en segundo lugar, se encuentran los Índices subjetivos, que son aquellos que intentan predecir sobre qué condiciones de elementos de clima puede una persona sentirse confortable, y por último los Índices psicofisiológicos, que se desarrollan a partir de datos fisiológicos medidos. Con base a estos índices, se establecen las llamadas zonas de confort térmico delimitadas gráficamente a través de cartas y diagramas que acotan los parámetros físicos y definen el dominio en el cual se establecen dichas zonas.

Para que los seres humanos experimenten una sensación de confort térmico, deben cumplirse principalmente dos requisitos, el primero es que la combinación de temperatura de la piel y la temperatura del centro del cuerpo proporcione una sensación de neutralidad térmica, y el segundo es el cumplimiento del balance de energía del cuerpo, es decir, el calor generado por el metabolismo debe ser igual a la cantidad de calor perdida por el cuerpo. Así, la relación entre estos parámetros, temperatura de la piel, temperatura del centro del cuerpo y actividad, tiene como resultado en una sensación térmicamente neutra (KVISGAARD, 1997).

2.7. Conceptos bioclimáticos

2.7.1. Comportamiento térmico en las edificaciones

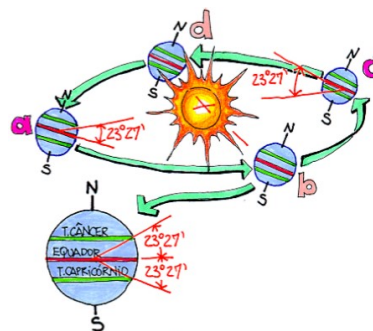
El análisis del comportamiento térmico de una edificación es calculado a partir de datos meteorológicos, radiación solar global, temperatura, humedad relativa del aire, dirección y velocidad de los vientos predominantes, registrados en las cercanías de los ambientes, en función del periodo de exposición del ritmo climático (VECCHIA, 2003). Dentro de esos elementos climáticos, la radiación solar es la que más influencia tiene en el comportamiento térmico de los materiales. De este modo, es posible evaluar el comportamiento térmico de las envolventes de una edificación analizando el intercambio térmico, es decir, los procesos de transmisión de calor.

2.7.1.1. Variables del clima

- *La radiación solar y su comportamiento térmico ante cuerpos opacos*

La radiación solar es una onda electromagnética, responsable de la energía recibida por la tierra. La inclinación del eje y la trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol, junto con el movimiento de rotación de la tierra, determinan las variaciones en la intensidad de la radiación a lo largo del año y durante el día. Las estaciones del año son definidas por el movimiento de traslación de la tierra alrededor del sol. La trayectoria elíptica diferencia al otoño (d) y la primavera (b) del invierno (a) y verano (c) (véase la Figura 6). Las regiones que más reciben radiación solar se localizan entre los trópicos: Cáncer en el Norte y capricornio en el hemisferio Sur (Figura 7). Bajo el punto de vista de un observador, el sol se mueve entre estas regiones, limitados por los solsticios de verano y de invierno (CARLO, GHISI, LAMBERTS 2003).

Figura 7. Representación del movimiento de la tierra.



Fuente: Lambert, Dutra e Pereira (2005).

La siguiente figura (Figura 8) muestra el comportamiento de la energía radiante cuando incide sobre un cuerpo opaco, la cual puede ser absorbida o reflejada. La siguiente ecuación (Ec. 1) muestra el balance de energía térmico.

$$\alpha \cdot RS + \rho \cdot RS = RS \rightarrow \alpha + \rho = 1 \quad (1)$$

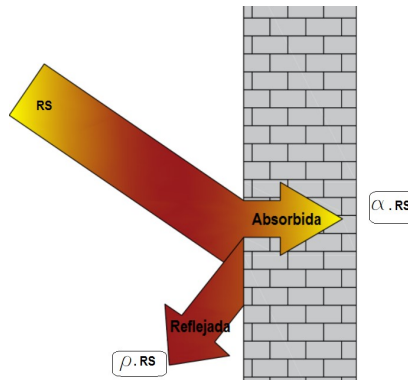
Donde,

RS es la radiación total incidente en la superficie (W/m^2).

α es la absorción solar (que varía en función del color).

ρ es la reflexión solar.

Figura 8. Comportamiento de energía radiante al incidir en un cuerpo opaco.



Fuente: La autora (2016).

La energía absorbida, se transforma en energía térmica o calor, sin embargo la reflejada no sufre modificaciones.

- *Temperatura del aire*

La temperatura del aire no es una consecuencia de la acción directa de la radiación solar, debido a que el aire es transparente a todas las longitudes de ondas electromagnéticas. El proceso se desarrolla indirectamente, la radiación solar llega al suelo, donde una parte es absorbida y transformada en calor, por lo que, el suelo se calienta y por convección, calienta el aire. Por tanto, la temperatura del aire será consecuencia de tres aspectos: de la radiación solar incidente, del coeficiente de absorción de la superficie receptora y de las pérdidas por evaporación, convección y radiación (GHISI; LAMBERTS, 1998).

El resultado de la actuación de estos fenómenos simultáneamente, ocasiona el aumento de la temperatura del aire partir de la salida del sol, llegando a un máximo que sucede aproximadamente dos

o tres horas después el paso del sol por el meridiano como consecuencia del calor almacenado en la tierra. A partir de ese momento, el balance de energía comienza a ser negativo, es decir, la energía perdida es mayor que la recibida, lo que produce un descenso de la temperatura de la superficie de la tierra hasta alcanzar su mínimo un poco antes del nacimiento del sol (CARLO; GHISI; LAMBERTS 2003).

- ***Humedad relativa del aire***

La humedad relativa se caracteriza por la cantidad de vapor de agua que contiene el aire, el cual es formado por la evaporación de agua, proceso que supone el cambio de estado líquido a gaseoso sin modificar la temperatura. El aire, a una determinada temperatura, puede contener una cantidad limitada de vapor de agua. Cuando sobrepasa esa cantidad, decimos que el aire está saturado. Pasado de ese límite de saturación, ocurre la condensación, proceso en el cual el vapor en exceso pasa a estado líquido, lo que provoca un aumento de la temperatura de la superficie donde acontece la condensación. La humedad del aire junto con la velocidad del mismo, intervienen en la pérdida de calor por evaporación. Como aproximadamente el 25% de la energía térmica generada por nuestro organismo es eliminada en forma de calor latente (10% de respiración y 15% por transpiración) es importante que las condiciones ambientales favorezcan esas pérdidas. De esta forma, a medida que la temperatura ambiente aumenta y dificulta la pérdida de calor por convección e radiación, el organismo aumenta su eliminación por evaporación. Cuanto mayor es la humedad relativa, menor es la eficiencia de evaporación para la eliminación de calor. Aquí radica la importancia de una buena ventilación (ÇENGEL, 2007).

Sin embargo, cuando la temperatura del aire es superior a la de la piel, los seres humanos ganamos calor por convección, pero al mismo tiempo se produce un fenómeno de efecto contrario, ya que la circulación del aire acelera la pérdida por evaporación. Si el aire está saturado, la evaporación no es posible, por lo que la persona empieza a ganar más calor siempre que la temperatura del aire sea superior a la de la piel. Si el aire está seco, las pérdidas continúan incluso con temperaturas más elevadas. Por tanto, la humedad relativa absoluta representa el peso de vapor de agua contenido por unidad de masa de aire (g/kg) y la humedad relativa es la relación entre la humedad absoluta de aire y la humedad absoluta del aire saturado para esa misma temperatura (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2005).

2.7.2. Formas de transmisión de calor. Intercambio térmico entre el cuerpo y el ambiente

Para poder comprender el comportamiento térmico de cualquier material sometido a condiciones climáticas es necesario estudiar los procesos de transferencia térmica. La condición esencial para la transmisión de calor es que los cuerpos posean diferentes temperaturas. Existen dos condiciones básicas que determinan los procesos de intercambio térmico: seco y húmedo. El intercambio térmico seco incluye: conducción, convección y radiación. Mientras que el intercambio húmedo contiene a la evaporación. Existen dos conceptos importantes a destacar, el calor perdido hacia el ambiente a través de intercambios secos se denomina calor sensible y varía en función de la temperatura del cuerpo y del ambiente. El calor perdido a través de intercambios de calor húmedos se denomina calor latente y compromete cambios de fase, es decir, el sudor (líquido) pasa a estado gaseoso a través de la evaporación (ARAÚJO, 1982).

Radiación, conducción y convección son los procesos de transmisión de calor con variación de temperatura. La ecuación 2, representa que la cantidad de calor sensible (Q_s) que un cuerpo de masa (m) recibe es directamente proporcional al aumento de la temperatura. Por tanto, es posible calcular la cantidad de calor sensible utilizando la siguiente ecuación (ARAÚJO, 1982).

$$Q_s = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde;

c es el calor específico del cuerpo, el cual determina la cantidad de calor que una masa necesita perder o ganar para que se produzca una reducción o aumento de una unidad de temperatura sin alterar su estructura.

ΔT es la variación de temperatura.

El proceso de transmisión de calor por radiación se produce por contacto entre moléculas de dos cuerpos, los cuales, uno posee la capacidad de transmitir y el otro de absorber. La radiación tiene características electromagnéticas, por eso no necesita medio de propagación, se produce en el vacío, como es el caso de la radiación solar, que además forma parte de la génesis del clima. Su influencia en los mecanismos de intercambio térmico son los más importantes, no solo por la fuerte incidencia directa sino también por las radiaciones provenientes del entorno. En el caso de transmisión por conducción, la transferencia de energía acontece cuando dos cuerpos están en contacto o entre partes de un mismo cuerpo, que estén a diferentes temperaturas. El calor es transmitido de temperaturas más altas hacia las más bajas en busca de equilibrio térmico (COSTA, 1982).

La convección se da cuando dos cuerpos están en contacto molecular, y al menos uno de ellos es un fluido. El proceso se produce en dos fases, una primera en la que el calor es transmitido por conducción y la segunda donde la variación de temperatura del fluido modifica su densidad y provoca

el movimiento de convección. Según Docherty y Szokolay (1999), el mecanismo de convección varía en función de la velocidad del aire, así como la radiación corporal depende de la temperatura del entorno.

Otros dos procesos que influyen en el intercambio de calor en trabajos realizados con vegetación son la evapotranspiración y evaporación. Esta última, se refiere al cambio de fase del agua, presente en las coberturas o fachadas vegetales, de líquido a gaseoso, para lo cual es necesario una energía presentada que es este casi se presenta en forma de calor. Respecto a la evapotranspiración, es un proceso exclusivo de la vegetación, el cual combina el proceso de evaporación del agua en la superficie de la vegetación y del sustrato con un proceso de transpiración, en el cual el agua captada por las raíces de las plantas es utilizada en las funciones metabólicas y escapa del vegetal hacia la atmosfera a través de los estomas, órganos presentes en las hojas de las plantas, respónsables por los intercambios gaseosos (SANTOS, 2012). La diferencia entre una superficie (cubierta o tejado) con o sin vegetación es cualitativa y cuantitativa. El proceso de transferencia de calor es totalmente diferente. La radiación solar, la temperatura externa y la humedad relativa presentan valores más bajos a medida que atraviesan la vegetación. Las plantas, para realizar sus funciones biológicas como la fotosíntesis, transpiración y evaporación, absorben una cantidad significativa de radiación solar. La radiación solar restante, alterada en términos de carga térmica, influye al ambiente interno a medida que pasa a través de la vegetación y de los elementos estructurales de los cerramientos (NIACHOU et al., 2001).

El proceso de disipación de calor para el ambiente puede generar desconfort cuando es excesivo o insuficiente. Por tanto, estos autores sostienen que el acondicionamiento térmico natural depende principalmente de la radiación solar y de la temperatura del aire y que la sensación de confort puede ser evaluada a través de la piel, ya que la temperatura de la misma se encuentra aproximadamente sobre los 33-34°C, es decir, si la temperatura del ambiente estuviera por encima de eso o por debajo, es probable sentir desconfort térmico.

2.7.3. Conceptos térmicos y definiciones: transmitancia térmica (U), amplitud térmica media (Δ), atraso térmico (ϕ) y conductividad térmica.

La Norma *ABNT NBR 15575-2 “Edificações habitacionais- Desempenho térmico: requisitos gerais”* define la transmitancia térmica como la trasmisión de calor en unidades de tiempo a través de un área unitaria de un elemento constructivo, es decir, paredes, cubiertas y vidrios, incluyendo las resistencias superficiales interna y externa inducida por la diferencia de temperatura entre los dos ambientes. El método para el cálculo de la transmitancia térmica está contemplado en la Norma *ABNT NBR 15220-2*.

Considerando la temperatura del aire externo y la temperatura superficial interna de un cerramiento cualquiera, la amplitud térmica media (Δ) es la diferencia entre las temperaturas medias máxima y mínima; el atraso térmico (ϕ), es el tiempo, en horas, transcurrido entre la variación térmica en el exterior y su manifestación en la superficie interna del cerramiento. El amortiguamiento térmico (μ) es la capacidad del cerramiento de disminuir las amplitudes de las variaciones térmicas, obtenidos por medio del cociente entre la amplitud superior interna (Δ_{si}) y a amplitud superior externa (Δ_{se}) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2003).

La conductividad térmica es una característica específica de los materiales de conducir energía térmica. Las estructuras hechas con materiales de alta conductividad térmica conducen dicha energía de forma más rápida y eficiente que las estructuras análogas construidas con materiales de baja conductividad. Por tanto, materiales con alta conductividad son utilizados como disipadores térmicos y materiales con baja conductividad se usan como formas aislamiento térmico. La conductividad térmica depende de la pureza del material, así como de la temperatura del mismo y se expresa en: $W m^{-2} K^{-1}$ (CALLISTER, 2003).

2.7.4. Inercia térmica

La inercia térmica es un factor importante para la determinación del comportamiento térmico de los elementos constructivos de una edificación, ya que es una propiedad dependiente del material y de sus dimensiones. Los materiales que presentan inercia térmica alta son utilizados para obtener el equilibrio térmico en el interior de las edificaciones. Dicho equilibrio sucede cuando la ganancia de calor interno por las paredes es mínima en verano y la pérdida de calor es mínima en invierno. Según Yannas y Maldonado (1995), el hecho de almacenar calor dentro de una estructura de un edificio, funciona como un disipador de calor, evitando la oscilación y los picos durante el día y disipando el calor más tarde.

Se puede afirmar que un edificio con poca inercia sigue muy de cerca la variación de la temperatura externa, mientras que, con una inercia infinita, la temperatura interna se mantendría constante, es decir, la necesidad de un edificio de poseer una gran inercia térmica aumenta cuanto mayor es la variación de la temperatura exterior, la radiación solar o las ganancias de calor. La relación entre el calor absorbido y el calor almacenado en los materiales de construcción depende de la capacidad térmica del material del que están construidas sus envolventes. La capacidad térmica por unidad de superficie es el producto de la densidad por el espesor y por el calor específico de sus componentes (YANNAS; MALDONADO, 1995).

La inercia térmica actúa de dos formas en el comportamiento térmico. Una de ella es la reducción de las oscilaciones internas de temperatura (Amortiguación térmica) y la segunda es el desfase temporal de las temperaturas internas en relación a las temperaturas externas (retraso térmico). Estos

parámetros están relacionados directamente con las características térmicas del material y su espesor (PAPST, 1999).

Según Rivero (1986), el retraso térmico (Φ), depende de dos parámetros que intervienen en el proceso como son: transmisión de calor por conducción en régimen variable, es decir, la conductividad térmica (λ), calor específico (c), densidad absoluta (d) y espesor (l). Ghisi y Lamberts (1998) entienden este concepto de una forma diferente. Para ellos es el tiempo que transcurre entre los momentos en los que ocurre la temperatura máxima del aire exterior y la interior de una edificación, y se verifica un flujo de calor a través de un componente constructivo sometido a una variación periódica de temperatura del aire exterior. El atraso térmico depende de la capacidad térmica del componente constructivo y del orden en el cual las capas se disponen.

Por otro lado, y como parte de la inercia, está la amortiguación térmica (μ). Rivero (1986) la define como la relación entre la amplitud de temperatura superficial interna de un cerramiento (ω_s) por la amplitud de temperatura del ambiente externo (θ_s).

La inercia térmica, dependiendo del clima, puede tener una influencia negativamente, neutra o positiva sobre el desempeño térmico y consumo energético de las edificaciones. Por tanto, el uso de elementos constructivos con una inercia térmica considerable permite acompañar otros dispositivos para el control de flujo de calor interior-exterior de una edificación (DORNELLES; RORIZ, 2005).

En el caso de las construcciones verdes, el flujo de calor es variable, es decir, transitorio. El régimen transitorio puede ser particularmente un caso de periodicidad, en el cual la temperatura de un mismo punto varía cíclicamente, como las oscilaciones de las temperaturas en relación a las paredes de una edificación expuesta día y noche a las condiciones atmosféricas (ARAÚJO, 1982; COSTA 1974).

2.8. Uso de la inercia térmica como herramienta de refrigeración pasivo

El uso de la inercia térmica puede ser beneficioso tanto para el verano como en el invierno. En el invierno, la ganancia solar durante el día es almacenada en la masa térmica y transmitida hacia el interior de las edificaciones durante la noche, periodo en el que realmente es necesaria la calefacción. Por el contrario, en verano, el calor es almacenado en la masa térmica, reduciendo picos de cargas de refrigeración. El calor es liberado para el interior de la edificación con un atraso, es decir, existe una variación en horario de pico de carga por refrigeración y una reducción del mismo. Comparando edificios con poca y mucha inercia térmica en estaciones como otoño y primavera, se observó que en edificaciones leves pueden precisar de calefacción para una parte del día y refrigeración para otra parte del día. Sin embargo, en edificaciones con inercia térmica, no presentan esta variabilidad, y dependiendo de las condiciones externas, pueden presentar condiciones internas confortables (SANTAMOURIS; ASIMAKOPOLOUS, 1996).

Goodwin y Catani (1979) realizaron trabajos de investigación sobre el efecto de la masa térmica y la necesidad del aislamiento para edificaciones en diferentes climas de Estados Unidos a través del programa NBSLD de la National Bureau of Standards. Los estudios concluyeron que una pared con mucha masa tiende a reducir el consumo de energía para refrigeración de locales, en las localidades geográficas con veranos moderados. Este mismo estudio de inercia térmica orientado para cubiertas, determinó que, en latitudes más bajas, menor es el efecto de la masa térmica para refrigeración, y para latitudes altas, donde la amplitud térmica externa oscila durante las estaciones calurosas, la masa térmica se vuelve más efectiva. Además, comparando edificaciones que poseían igual resistencia térmica, pero diferentes inercias térmicas, en las edificaciones con más masa térmica, se observó una reducción de las cargas por refrigeración.

2.9. Cálculo de los límites de confort térmico

Como apoyo teórico para la discusión de los resultados, fueron calculados los límites de confort térmico. Éstos fueron estimados a partir del índice de confort adaptativo sugerido por la ASHRAE (2013), la cual establece una metodología para determinar los grados-hora de desconfort percibido por los usuarios dentro de una determinada edificación. Esta metodología se basa en la hipótesis de que las personas se adaptan a su entorno. Esta norma establece una zona de confort aceptable a partir de la ponderación de las temperaturas externas de los días anteriores al periodo estudiado, de esta forma son calculados los límites de confort superior e inferior, ya sea para el 80% o el 90% de las personas satisfechas (ASHRAE, 2013).

La ecuación adoptada para este estudio corresponde al índice de confort para el 80% de las personas satisfechas (Véase Ec. 3 y Ec. 4).

$$\text{Límite superior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{(pma(out))} + 21.3 \quad (\text{Ec. 3})$$

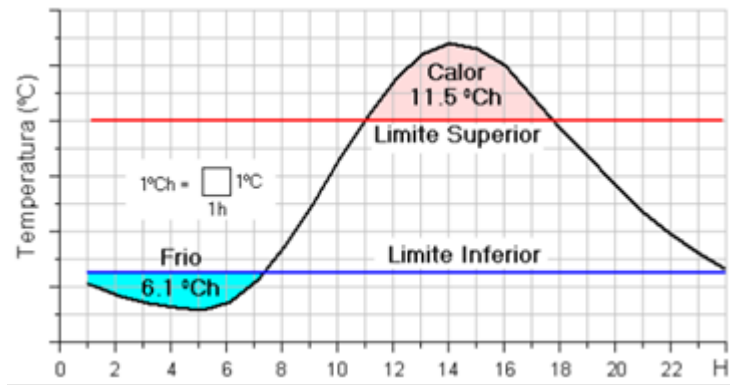
$$\text{Límite inferior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{(pma(out))} + 14.3 \quad (\text{Ec.4})$$

Donde $t_{(pma(out))}$ corresponde a las temperaturas diarias medias de los últimos 15 días. La temperatura de confort se ubica en la mitad de la franja. Esta ecuación fue aplicada para los días críticos experimentales, por lo que se consideraron los 15 días anteriores éstos.

Junto con los límites de confort térmico se realizó una cuantificación de grados-horas de desconfort a partir del método adaptativo indicado por ASHRAE (2013). Para cuantificar los grados-horas de desconfort son comparadas las temperaturas límites (superior e inferior) y la temperatura operativa (TBS) para cada hora. Los grados-horas de desconfort son representados por el área formada bajo (frío) o sobre (calor) la curva y son generados cuando la temperatura operativa interna de las células de ensayo sobrepasa los límites establecidos por la norma, siendo para calor números

positivos y para frío números negativos, como se observa en el siguiente gráfico, como muestra la Figura 9.

Figura 9. Límites de confort - grados horas por desconfort en frío y calor



Fuente: Roriz, Chvatal e Cavalcanti (2009).

3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La hipótesis principal de este proyecto de investigación fue evidenciar si el uso de vegetación en sistemas habitacionales con cubiertas ajardinadas y fachadas verdes puede contribuir a la mejora del comportamiento térmico de ambientes internos ubicados en clima tropical de altitud en días críticos experimentales, favoreciendo así las condiciones de temperatura internas en periodos de mayor o menor temperatura externa y así verificar la influencia de las variables climáticas en el interior de las edificaciones.

El objetivo principal de este trabajo fue determinar y cuantificar comparativamente sistemas constructivos, utilizando fachadas y cubiertas con vegetación (combinados o no), y determinar si influyen en las variables térmicas internas de dichas edificaciones, ofreciendo un mejor confort térmico y, consecuentemente, una mayor eficiencia térmica, en respuesta al calor o al frío (considerando un día crítico de calor durante la primavera y un día crítico de frío en invierno). Se suma a este objetivo el análisis de dicho comportamiento con el uso de ventilación natural en un día crítico experimental de calor.

Para alcanzar el objetivo principal, se llevaron a cabo diferentes mediciones de temperaturas internas del aire (TBS) y temperaturas superficiales internas (TSI), en condiciones en las que la radiación solar y la temperatura del aire externo alcanzaron sus máximos y mínimos valores registradas en el periodo de registro de datos. Así, resultaron como los objetivos específicos, el registro de temperaturas internas superficiales y temperaturas internas del aire durante un año con el fin de realizar una selección de los días críticos experimentales de frío y de calor para su posterior análisis junto con la observación de días típicos y selección de los mismos. Además, una vez instalado el sistema de riego automático, se realizó una estimación los tiempos de riego para el mantenimiento de las plantas seleccionadas para llevar a cabo dicho proyecto.

4. MATERIAL Y MÉTODOS

Este estudio de envolventes vegetales en la arquitectura, tiene como finalidad la utilización de métodos y técnicas constructivas que provoquen menor impacto que las construcciones convencionales, así como una mejora del confort de ambientes internos. Para su estimación, se instalaron cuatro células experimentales en las que se plantó vegetación en las fachadas norte y oeste (Norte y Oeste, respectivamente), así como en las cubiertas, como muestra la Tabla 2.

Tabla 2 - Resumen de tipos de células de ensayo utilizadas

CONSTRUCCIÓN	EMPLAZAMIENTO DE LA VEGETACIÓN
Célula control (CC)	Sin vegetación.
Célula 1 (FV)	Fachadas vegetales (N y O)
Célula 2 (CV)	Cubierta vegetal.
Célula 3 (CV+FV)	Cubierta vegetal + fachadas vegetales (N y O)

Fuente: La autora (2015).

Los datos de temperaturas superficiales internas (TSI) y de la temperatura del Bulbo Seco (TBS) fueron medidas por medio de termopares instalados en las células de ensayo. Los datos de radiación solar y de las demás variables climáticas fueron registrados por la estación meteorológica automática del Centro de Recursos Hídricos y Estudios Ambientales (CRHEA) de la Escuela de Ingeniería de Sao Carlos, Universidad de São Paulo (EESC-USP).

Para la obtención de los resultados, este trabajo fue basado en el análisis y registro de datos durante un año, dentro del cual se seleccionaron los tres días experimentales. Los días fueron denominados críticos experimentales y son aquellos que se definen como:

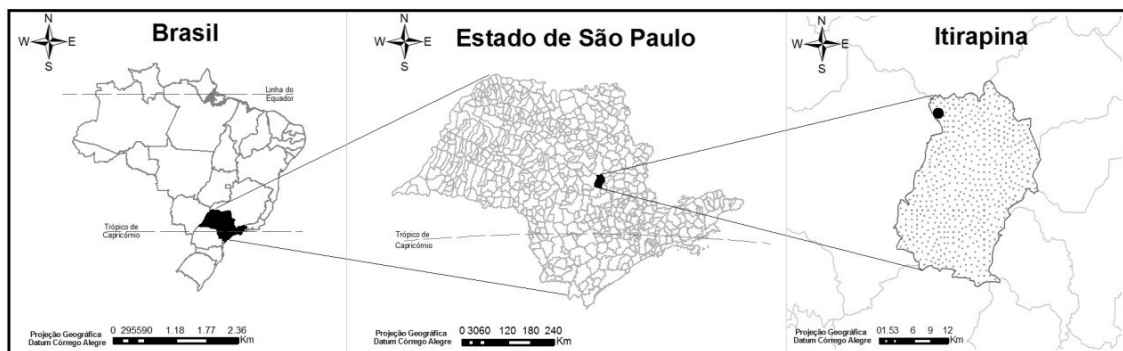
- Un día crítico experimental de frío (invierno) – 10 de Julio de 2015. Se define día experimental de frío, como aquel en el que fue registrada, como forma de excepcionalidad climática, una temperatura mínima horaria menor que las temperaturas mínimas absolutas de la serie histórica para ese periodo registradas en las Series Históricas Climatológicas 1961-1990, ambas publicadas en 1992 por el Ministerio de Agricultura y Reforma Agraria, Departamento Nacional de Meteorología (Brasil). Cuando se habla de macroclima son observadas las características climáticas de una región, normalmente medidas por estaciones meteorológicas. Las series históricas son un ejemplo de datos medidos por estaciones que caracterizan los climas de las ciudades y son normalizadas por la organización meteorológica Mundial calculadas para periodos de 30 en 30 años obtenidas a partir de las medias mensuales de los totales diarios.

- Un día crítico experimental de calor: Fueron usados dos días críticos de calor, el 24 de septiembre de 2015 (primavera) y 24 de diciembre de 2015 (ventilación). Se define día experimental de calor, como aquel en el que fue registrada, como forma de excepcionalidad climática, una temperatura máxima horaria mayor que las temperaturas máximas absolutas de la serie historia para ese periodo.

4.1. Localización y caracterización del área de estudio

Este proyecto fue desarrollado en Itirapina – S.P. en los márgenes del embalse de Lobo a 733m de altitud sobre el nivel del mar (Figura 10). Es una zona compleja de definir debido a las acciones de la génesis climática, por ser una región situada en transición de sistemas atmosféricos polares e intertropicales. Se localiza en una zona considerada tropical de altitud, dominio de clima *Cwa* en la clasificación internacional de Köppen, caracterizado por ser un clima cálido con inviernos secos, en el cual la temperatura media del mes más frío es inferior a 18°C y el mes más caluroso supera los 22°C (FERRARI, 2012, p.25).

Figura 10. Localización del área de estudio



Fuente: La autora (2015).

Las células de ensayo de dimensiones 2,20 x 2,60 x 2,90m, asentadas sobre mortero de cemento y arena elaborado in situ, son construcciones de ladrillo macizo de dimensiones 10 x 20 x 5 cm, con juntas de 1.5 cm de espesor. Poseen una puerta de madera con orientación Este de medidas estándar 2,10 x 0,60m y una ventana, también de madera orientada al Norte de 1x0.70m. Fueron diseñadas con la misma orientación, de forma que reciben por igual radiación solar, viento o cualquier otro evento atmosférico, a fin de que las condiciones climáticas actúen simultáneamente y con la misma intensidad, en cada una de ellas, tal y como muestra la Figura 11.

Figura 11. Vista panorámica realizada con dron de las células experimentales



Fuente: Foto realizada con Dron por Fraccaroli (2015).

4.2. Sistema constructivo y desarrollo de las fachadas verdes y cubiertas verdes

El tipo de sistema verde vertical adoptado fue aquel que no mantuviera el contacto directo con la pared, ya que la opción instalación directa sobre la fachada superaba las expectativas de presupuesto. Se adoptó, por tanto, un método constructivo basado en una tela metálica sin contacto con de las fachadas de ladrillo formando un ángulo de 30 grados respecto del tejado, como muestra la Figura 12.

Figura 12. Crecimiento de la planta sobre tela metálica.



Fuente: La autora (2015).

Las fachadas vegetales fueron instaladas en las fachadas Norte y Oeste por ser las que más horas de radiación solar reciben. Constan, básicamente, de una malla metálica hexagonal de 2.40 m de ancho por 3m de alto anclada a la fachada y al suelo mediante ganchos (Figura 13).

Figura 13. Vista de las fachadas verdes Oeste



Fuente: La autora (2015).

Una vez colocada la malla necesaria para que el crecimiento de las plantas sea ascendente y logre cubrir toda la superficie, se plantó la especie *Thunbergia grandiflora*, incluida dentro de la familia de las Acanthaceae. Esta planta es una trepadora de bajo mantenimiento procedente de zonas tropicales y subtropicales. Se trata de una enredadera herbácea, voluble, de hojas verde oscuro y simples, opuestas y enteras, cuya nervadura central y algunas laterales terminan en mucrón. Otras denominaciones de la *Thunbergia grandiflora*, son Tumbergia azul (Figura 14), enredadera de trompeta azul o Bignonia azul (MARTINEZ; SCOONES; PALADINI, 2002).

Figura 14. Detalle Flor *Thunbergia grandiflora*.



Fuente: La autora (2015)

El ciclo anual de las plantas y el crecimiento de éstas son dos importantes componentes para asegurar el cometido de las fachadas vegetales. A pesar de las consecuencias que conlleva trabajar con seres vivos, las plantas siguen unos ciclos bastante constantes en relación al desarrollo. Estas pautas son, sin embargo, propias de cada especie y variables en función del clima en el que la planta se ubica (PÉREZ, 2010) (Figura 15).

Respecto a la manutención de las fachadas, se realizaron podas periódicas cada dos meses.

Figura 15. Detalle fachada vegetal Oeste.

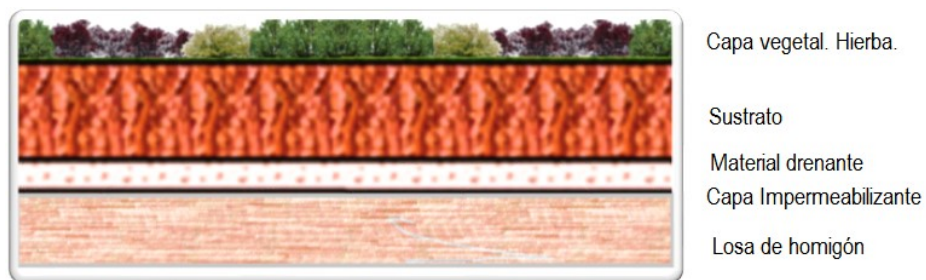


Fuente: La autora (2015).

Para la construcción de las cubiertas verdes, fue hormigonada *in situ* una losa premoldada de cerámica con vigas de hormigón prefabricado con una inclinación de 23% y pretilos de 0.40 m. de ladrillo cerámico para formar el cajón donde se colocó el sustrato.

El conjunto está formado por una capa impermeabilizante, una geomanta, un sustrato y hierba como se muestra en la Figuras 16 y 17.

Figura 16. Perfil de cubierta ajardinada



Fuente: La autora (2016).

Figura 17. Construcción de tejados verdes



Fuente: La autora (2014).

A continuación, pasará a describirse cada elemento que conforma el sistema:

- *Geosintético y drenaje.*

El elemento de drenaje usado fue una manta geosintética MacDrain 2L utilizado para drenaje de autopistas y de otras obras civiles, de característica leve y flexible, cuyo núcleo drenante está formado por una geomanta tridimensional, compuesta por filamentos de polipropileno, con una espesura de entre 10 y 18 mm, termosoldada entre dos geotextiles con resina a base de poliéster en todos los puntos de contacto (VECCHIA, 2005). Para el drenaje se colocaron dos tubos de PVC en extremos inferiores.

- *Vegetación. Gramínea.*

Como vegetación para la cubierta se colocó la gramínea *Paspalum notatum* (Figura 18) nativa del continente americano, conocida en Brasil como grama batatais, grama-forquilha, grama-mato-grosso, grama-comum e grama-de-pasto (LORENZI; SOUZA, 2000). Posee hojas concentradas en la parte basal de la planta. Una de las propiedades por las que más destaca es la facilidad para cubrir fácilmente el terreno, formando grandes alfombras, razón por la cual se usa en campos de fútbol y áreas verdes, incluso como protección contra la erosión del suelo (KISSMANN, 1997). Es una especie capaz de adaptarse a suelos poco fértiles, en condiciones de déficit hídrico resistente a la acción de los rayos solares y el pisoteo, aunque necesita cortes frecuentes para mantener una buena calidad (GOATLEY; MALDDOX; WATKINS, 1996).

Figura 18. Detalle de la hierba. Especie batatais, grama-forquilha



Fuente: La autora (2014).

4.3. Sistema de riego automático por aspersión

La aspersión es un método de riego donde el agua es pulverizada simulando lluvia intensa y uniforme. Debido a la climatología de la zona donde se realizaron los experimentos y con el fin de controlar la cantidad de agua consumida y dar una autonomía a los experimentos (Figura 19), se instaló un sistema de riego por aspersión, buscando un sistema al menor costo y que tuviese una eficiencia máxima. Éste sistema de irrigación presenta las siguientes ventajas: se adapta a todo tipo de suelos, tasa de aplicación de agua regulable, alta eficiencia de riego, posibilidad de aplicar fertilizantes en el sistema, caudal regulable y además el sistema puede ser totalmente automatizado, como en este caso de estudio.

Después de contemplar varios sistemas, se optó por un sistema formado por: una bomba, dos válvulas solenoides (una para fachadas y otra para cubiertas) conectadas a un panel de control que abre y cierra dichas válvulas en función de la programación elegida, la Tabla 3, muestra los equipos de los que consta dicho sistema.

Tabla 3 - Equipos de los que se compone el sistema de riego automático

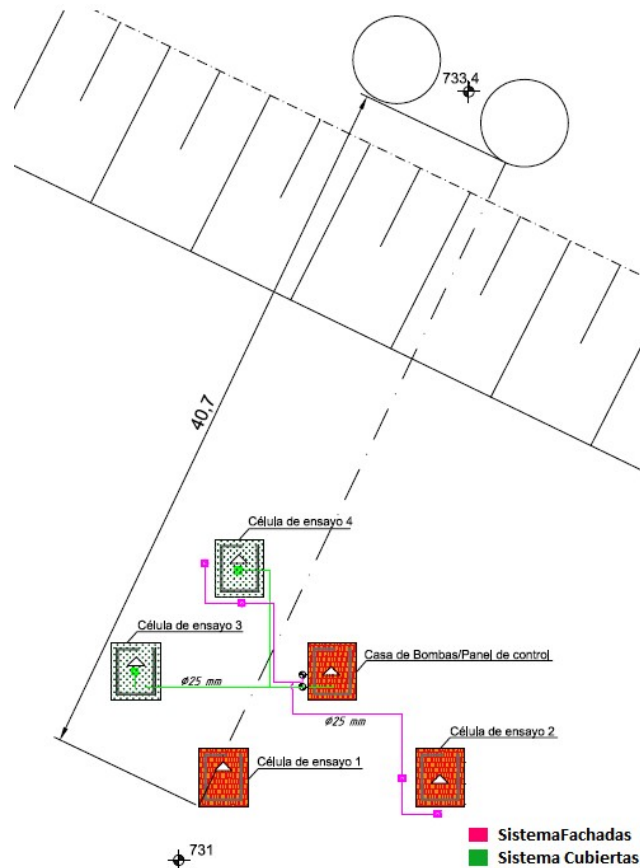
EQUIPO	DEFINICIÓN
<p>BOMBA</p> 	<p>La bomba utilizada es alimentada por una toma eléctrica de 220V. El agua llega hasta ella mediante tubo de PVC de diámetro 3/4" desde un pozo situado a 40m. Tiene una potencia de 0.8HP y un caudal de 0.6-3.6 m³/h</p>
<p>PROGRAMADOR</p> 	<p>Se programó un horario de riego personalizado que controla los días de riego, las horas de inicio y los tiempos de funcionamiento de cada estación. En este caso, considerando el tipo de suelo y el tipo de plantas usadas, se programaron dos estaciones, las 6h y a las 19h, durante 3 minutos para las cubiertas y para las fachadas 2 minutos.</p>
<p>ELECTROVÁLVULAS</p> 	<p>Se instalaron dos unidades, una que controla el funcionamiento de las fachadas y otra que controla el tiempo de funcionamiento de las cubiertas.</p>
<p>ASPERSOR 360° PARA CUBIERTAS Y 180° PARA FACHADAS.</p> 	<p>El número de aspersores se calcula en función del tamaño de la superficie a regar, en nuestro caso, bastó con uno por cada elemento a irrigar. Uno por cada fachada (Total de 4 aspersores 180°C) y uno por cada cubierta verde (2 aspersores, 360°).</p>
<p>SENSOR DE LLUVIA</p> 	<p>El sensor de lluvia fue colocado con el objetivo de controlar el consumo de agua, ya que, además de medir la precipitación automáticamente, evita que el sistema de riego se active en días lluviosos.</p>

Fuente: La autora: (2015).

La Figura 19 representa un esquema de la instalación del sistema de riego, del cual se realizó la captación de agua en una conducción próxima a los tanques de evaporación de la estación del CRHEA y fue canalizada hasta la célula donde fue colocada la bomba. Desde ahí, dicha instalación se ramifica

en dos, una conducción para los tejados y otra para las fachadas, debido a que ambas instalaciones poseerán diferentes tiempos de riego debido a la tipología de las plantas.

Figura 19. Planta sistema de riego por aspersión



Fuente: La autora (2015).

Asimismo, se realizó una estimación sobre los tiempos de riego para que cada una de las plantas empleadas (*grama batatais* para los tejados y *Tumbergia Grandiflora* para las fachadas) tuvieran un buen desarrollo. La *Tumbergia* es una planta resistente, poco exigente con el suelo y de baja mantenimiento, razón por la cual necesitó de menos tiempo de riego. Finalmente se mantuvo una programación de 1 minuto para las fachadas y 2 minutos para las cubiertas días alternos para las épocas de estiaje. En época de lluvias, permanecieron los mismos tiempos dos días por semana. Los días de funcionamiento del sistema de irrigación varían en función de la precipitación que recibe el sensor de lluvia. Destacar que el consumo medio de agua por aspersor es de $0.6 \text{ m}^3/\text{h}$.

4.4. Mediciones automáticas

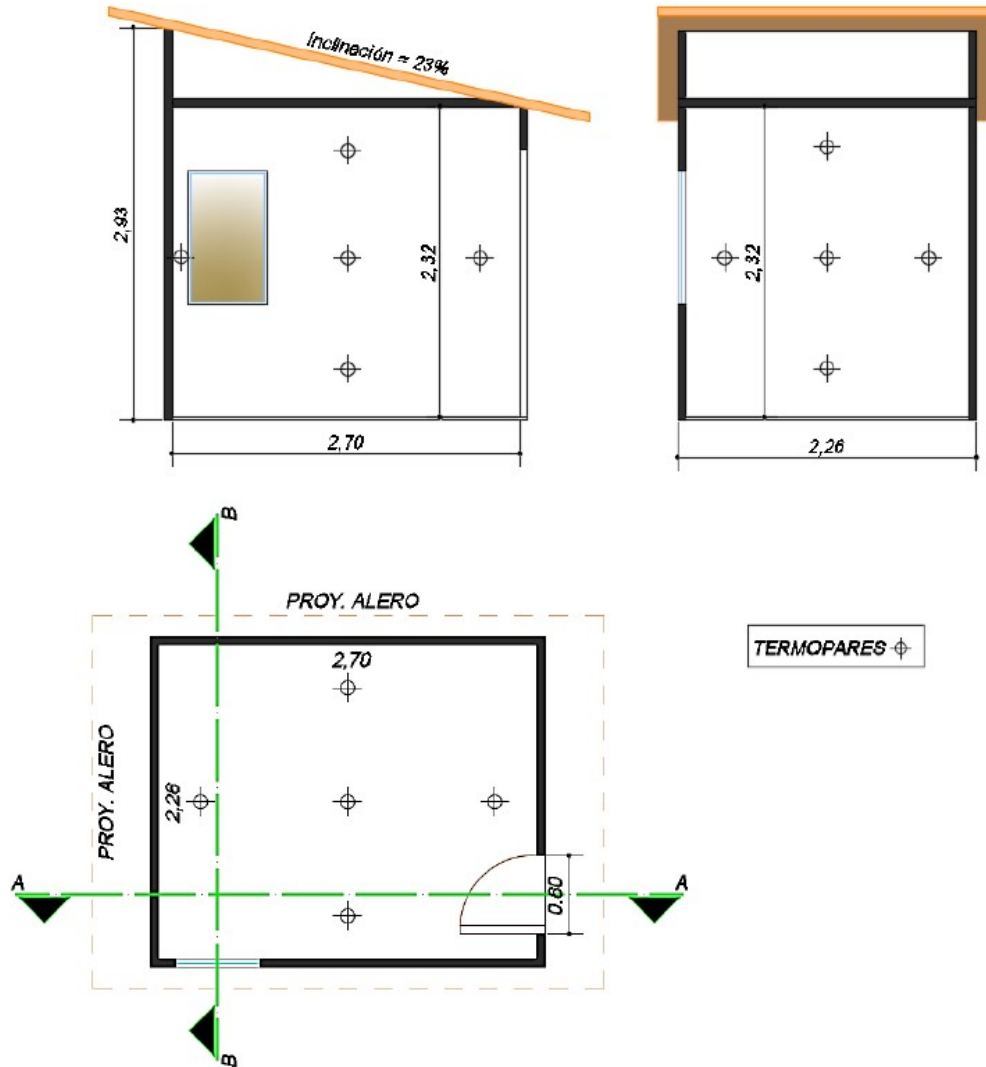
En cada prototipo de ensayo se han dispuesto 16 termopares tipo T (Cobre-constantán) 2x24 WG, como se observa en la Figura 18. Los termopares se caracterizan por ser un instrumento muy preciso. La temperatura puede ser medida con un error de $\pm 0,1-0,2^{\circ}\text{C}$ (KINZIE, 1973). Las mediciones se destinaron a estudiar el comportamiento térmico de las superficies y del aire interior, comparándolas posteriormente con los otros prototipos de los que se compone el experimento.

Por esta razón, fueron colocados 64 termopares en las superficies internas de las fachadas y techos, 16 por cada elemento constructivo. 15 de ellos miden los valores de las temperaturas superficiales y otro termopar fue colocado en el centro geométrico de cada célula de ensayo a una altura de 1.20 m aproximadamente para la realización las mediciones de las temperaturas del bulbo seco (TBS), como la norma ABNT NBR 15575-1 que se contempla en el Anexo A. Los termopares fueron calibrados introduciendo todos ellos juntos en un recipiente con hielo fundente para verificar la temperatura y el tiempo de respuesta de cada sensor antes de la instalación,

Los termopares están conectados a dos multiplexores de 32 canales Campbell Scientific AM 416 y estos a su vez conectados como un Data Logger programable Campbell Scientific CR1000, acoplados a batería alimentada por una placa solar que da autonomía a los equipos. El Data Logger fue programado para realizar un registro de temperaturas en intervalos de 30 segundos y medias totalizadas cada hora. Ambos equipos, fueron revisados actualmente por la propia empresa por lo que están debidamente configurados y calibrados.

En la Figura 20, se muestra la distribución de los termopares en las fachadas y en la cubierta.

Figura 20. Distribución de los termopares.



Fuente: La autora (2015).

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Análisis climático de los días estudiados. Día crítico experimental de frío (10 de julio de 2015) y día crítico experimental de calor (24 de septiembre de 2015)

Desde la perspectiva climática utilizada en este trabajo, fueron definidos los días críticos experimentales considerando el estado atmosférico dominante en el periodo de análisis. Se utilizaron como referencias la serie de datos históricos de 1961-1990, publicado en 1992, por el Departamento Nacional de Meteorología del Ministerio de Agricultura y Reforma Agraria de Brasil.

Según Vecchia (1997), para hacer una estimación del clima más precisa, se puede realizar un análisis climático por medio de episodios representativos o periodos de observación de los tipos de tiempo, es decir, estudiar la intensidad y duración de cada masa de aire que predomina sobre un determinado lugar, relacionada con los fenómenos de circulación atmosférica. Las consecuencias del avance de un frente frío sobre una determinada localidad presentan características peculiares de cada época del año analizada (otoño, invierno).

La región del municipio de Itirapina, desde un punto de vista de la climatología dinámica, se caracteriza por ser una región de paso de frentes fríos a lo largo del año. El dominio de las masas actuantes en la región se puede dividir en dos etapas principales, Pre y Post Frontal que se subdividen en otras dos, Presagio y Avance, que se dan antes de la penetración de la masa Polar Atlántica (mPA) de características cálidas. Posteriormente, ocurren las fases de Dominio y Transición, en las cuales predominan las condiciones de tiempo impuestas por la masa Polar Atlántica (mPA) de característica fría, y en ocasiones húmeda (MONTEIRO, 1967).

Esa clasificación es beneficiosa ya que, de acuerdo con la necesidad de análisis climático orientada al comportamiento térmico, se puede determinar cuál es la fase más adecuada para la realización de experimentos (VECCHIA, 2005). En el caso del presente trabajo, fue seleccionado un periodo en la fase de dominio de la Masa polar Atlántica (mPA), ya que es ahí, cuando ocurre un enfriamiento del aire.

Cabe destacar, que el año 2015, cuando se realizó este trabajo experimental, fue un año bajo la influencia de El Niño, fenómeno climático de carácter atmosférico oceánico, donde ocurre un calentamiento anómalo de las aguas superficiales y sub-superficiales del Océano Pacífico Ecuatorial. Las causas que lo provocan son aún bastante desconocidas por los especialistas, tiene un periodo de duración de entre 10 y 18 meses y sucede de forma irregular en intervalos de 2 a 7 años. Este fenómeno tiene como consecuencia la alteración de algunos factores climáticos regionales y globales:

- Pluviometría: aumento del índice de lluvias en la costa oeste de América del Sur.
- Vientos. Los vientos soplan con menos fuerza en la región central del Océano Pacifico.

- Acumulación de aguas más cálidas de lo normal en la costa Oeste de América del Sur.
Intensificación de seca en el Nordeste Brasileiro.

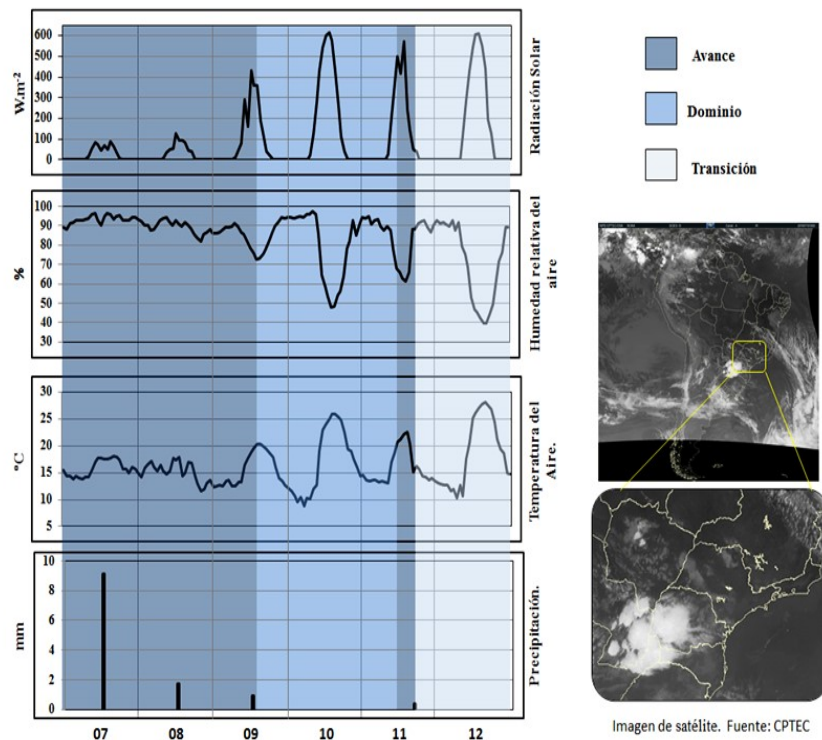
- Desplazamiento de las masas de aire.

El fenómeno de El Niño, es bastante influyente en meteorología, no solo en el Pacífico sino también en otras regiones del mundo, tanto como para aumentar la temperatura media global en más de 0.5°C, debido a que la variación de los campos de presión sobre el pacífico tropical afectan en el sistema general de circulación atmosférica, por lo que la influencia de El Niño también se aprecia más allá de la zona directamente afectada, aunque sus efectos disminuyen al alejarse. Por esta razón, se producen intensas sequías en el Nordeste de Brasil (NOLASCO; ALBORES; TORRES, 2010)

Para realizar el estudio de reacción frente al frío, se consideró el Episodio climático del 07 al 12 de Julio de 2015, días en que la región estudiada del Noroeste del estado de São Paulo estuvo bajo el dominio de una masa de aire fría. En la figura 21 se muestran las variables climáticas para ese periodo: Radiación solar, Humedad Relativa, Temperatura y Precipitación. Analizando dichas condiciones climáticas registradas en el mes de Julio, se observa un día 10/07/2015, que puede ser considerado como crítico experimental de frío ya que en él se registró, como forma de excepcionalidad climática, un valor de la radiación solar de 614 (W.m⁻²) y una temperatura mínima horaria de 8.8°C, temperatura menor a las mínimas absolutas de la serie historia (12.1°C) para ese periodo.

En la Figura 21 se observa la circulación atmosférica predominante en la región del Estado de São Paulo con la llegada de un frente frío en los días 7 al 9 de Julio, con acumulación de precipitaciones con valores superiores a 9 mm, una alta concentración de humedad del aire y las temperaturas variantes entre 12°C y 18°C aproximadamente.

Figura 21. Análisis climático. Episodio del 7 al 12 julio 2015



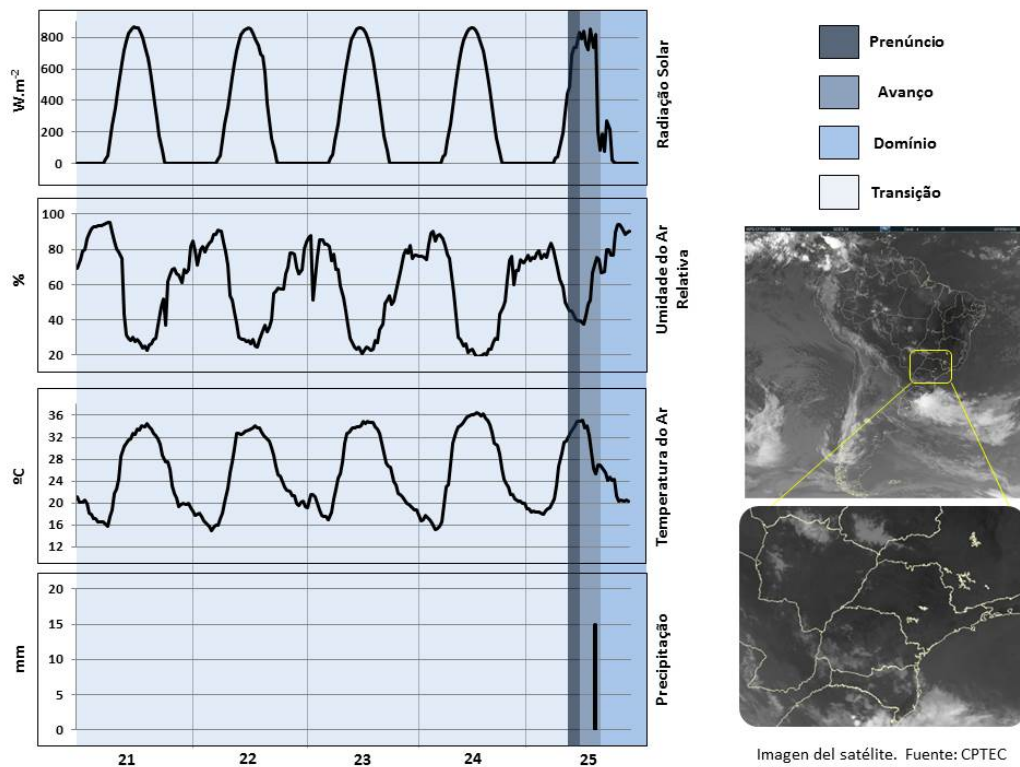
Fuente: La autora (2016).

El día excepcional de frío se produjo el día 10 de Julio, después del desplazamiento de un frente frío hacia latitudes más bajas de América del Sur, cuyo centro de acción de la masa polar se situó en el estado de São Paulo, estableciendo uno de los episodios de frío más intenso en el periodo analizado. Sobre el Dominio de la masa fría, la temperatura mínima ocurrió en la madrugada del día 9 al 10, con valores 8.8°C. Durante el transcurso de ese día, la temperatura máxima fue de 26°C, con ausencia de nubosidad y registros altos de radiación solar. En los días 11 y 12 del mismo mes, condicionados por la inestabilidad atmosférica, dicha región registró precipitaciones y, posteriormente, la fase de transición del sistema polar sobre la región de estudio.

Para realizar el estudio de reacción frente al calor, fueron analizadas las condiciones climáticas para el mes de septiembre. En la figura 22 se muestran dichas variables para el periodo del 21 al 25 de dicho mes: Radiación solar, Humedad Relativa, Temperatura y Precipitación, a partir del cual fue seleccionado un día considerado como crítico experimental de calor, día 24 de septiembre de 2005, puesto que ese día se registró, como forma de excepcionalidad climática, una temperatura máxima horaria de 35,8°C, mayor a las máximas absolutas para ese periodo registradas en las series históricas Climatológicas 1961-1990 (27°C) y una radiación solar de 859 W/m². Dicho periodo se caracterizó por la estabilidad atmosférica precedida por la transición de una fase Polar en fase de tropicalización y predominio de un anticiclón sobre gran parte de América del Sur, con notable aumento de las temperaturas máximas de entre los días 21 y 24, alcanzando el día 24 el registro más alto (35,8°C) y el

valor mínimo de 15°C. No se registraron valores de precipitación. El día 25 de septiembre, el avance de un Sistema Polar derivado de latitudes más altas, trajo inestabilidad atmosférica y una precipitación con valor de 15 mm, descenso de la temperatura máxima y aumento de la temperatura mínima. Fueron registrados valores altos de humedad relativa de aire y un cambio significativo de la radiación solar, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22. Análisis climático. Episodio del 21 al 25 septiembre 2015



Fuente: La autora (2016).

5.2. Estudio del comportamiento térmico

5.2.1. Temperaturas internas del aire (TBS)

Mediante el estudio de las temperaturas internas del aire (TBS) junto con las temperaturas internas superficiales (TSI), puede ser estimado el comportamiento de ambientes interiores y de esta forma obtener una percepción del confort térmico en edificaciones. Por esta razón, este capítulo ha sido dividido en el análisis de dichos conceptos. Según Givoni (1976) y Givoni y Vecchia (2001), la temperatura del aire externa de los edificios y la radiación solar que éstos reciben siguen patrones cíclicos diurnos y anuales, cuyos límites de variación dependen de la localización geográfica. Así

mismo, las condiciones térmicas internas de las edificaciones que no están sujetas al uso de ningún sistema mecánico de control de temperatura (p.ej. Aire acondicionado o calefacción), también siguen patrones cíclicos, a pesar de poder sufrir alguna modificación debida a las características del proyecto constructivo. El estudio vinculado al comportamiento térmico de las edificaciones con vegetación en sus cubiertas y con fachadas verdes tiene como objetivos obtener beneficios energéticos y mejorar el confort térmico del ambiente construido. Según Vecchia (2003) el desempeño térmico presupone la utilización de patrones de referencia comparativa con otros parámetros térmicos o situaciones anteriores.

El desempeño térmico de un edificio depende de su forma, orientación, material con los que fue construido y de las condiciones climáticas del lugar donde se encuentra. En las Figuras 23 y 24 muestra la temperatura interna del aire (TBS) y la temperatura externa del aire, como datos experimentales, así como los límites de confort térmico calculados a partir de las siguientes ecuaciones 1 y 2 (ASHRAE, 2013), para los días críticos experimentales, un día de frío y un día de calor, con el fin de comprobar la hipótesis 1 considerada anteriormente. Dicha hipótesis está basada en la comprobación de que el uso de vegetación en sistemas habitacionales con cubiertas ajardinadas junto con fachadas verdes, puede contribuir a la mejora del comportamiento térmico, favoreciendo así las condiciones térmicas internas en periodos de mayor o menor temperatura externa.

La ecuación adoptada para este estudio corresponde al índice de confort para el 80% de las personas satisfechas, como fue mencionado anteriormente.

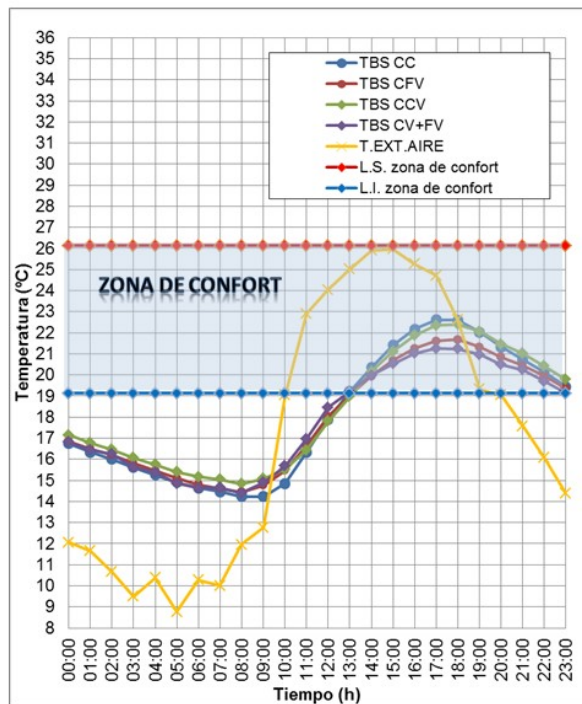
$$\text{Límite superior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{(pma(out))} + 21.3 = 26.14^{\circ}\text{C} \quad (3)$$

$$\text{Límite inferior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{(pma(out))} + 14.3 = 19.14^{\circ}\text{C} \quad (4)$$

Esta ecuación fue aplicada para el día crítico experimental 10 de Julio de 2015, para lo que se consideraron los 15 días anteriores a éste.

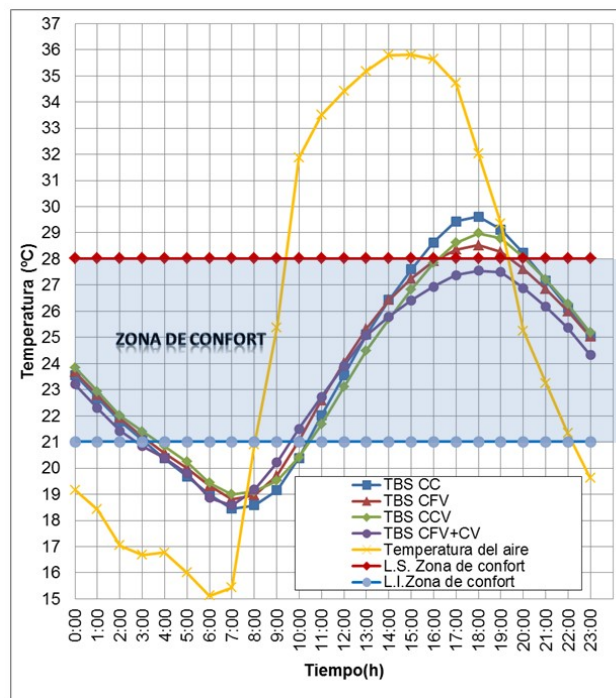
La Figura 23, muestra el comportamiento de las temperaturas durante un día crítico de frío, el 10 Julio de 2015. En este día fue registrada una temperatura mínima externa de 8,7°C a las 5:00h y una temperatura máxima de 27,97°C a las 15:00h, por tanto, estamos ante una amplitud térmica externa 19,27°C.

Figura 23. Temperatura del Bulbo Seco para el día crítico experimental de frío: 10 de julio de 2015



Fuente: La autora (2015)

Figura 24. Temperatura del Bulbo seco para el día crítico de calor. 24 de septiembre de 2015



Fuente: La autora (2015)

En la Figura 24, se muestran las mismas temperaturas para un día crítico de calor, 24 de septiembre de 2015, donde fue registrada una temperatura máxima de 35,8°C a las 15:00h, y una mínima de 15,12°C a las 6:00h, por tanto, una amplitud térmica diaria externa de 20,68°C. De la misma forma fueron calculados los límites de confort térmico cuyos valores se muestran a continuación en la Ec. 5 y 6.

$$\text{Límite superior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{(pma(out))} + 21.3 = 28^{\circ}\text{C} \quad (5)$$

$$\text{Límite inferior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{(pma(out))} + 14.3 = 21^{\circ}\text{C} \quad (6)$$

Los resultados obtenidos a través de los registros, tanto en el día de frío como en el día de calor, indican siempre una variación entre el periodo nocturno, con característica predominante fría, es decir, por debajo del límite inferior de confort, y el periodo diurno, donde algunas células se encuentran dentro de los límites de confort y otras fuera por exceso de temperatura, en el caso del día de calor.

En el periodo matinal, ambos gráficos, muestran las temperaturas externas del aire siendo siempre inferiores a los valores observados en el interior. Observando los datos de las temperaturas internas del aire en este periodo, las cuatro células de ensayo siguen un mismo comportamiento, todas se hallan por debajo del límite inferior de confort térmico, es decir, se encuentran en disconfort por frío. Esto es debido a que, en esas horas del día, las temperaturas son más bajas y la humedad relativa del aire aumenta, de ahí que ocurran intervalos de estrés térmico de frío.

Las temperaturas internas más bajas para los dos días críticos son registradas en la célula de ensayo Control, aquella construida sin vegetación, la cual presenta un comportamiento de sus temperaturas internas más próximo a los valores registrados de temperatura externa.

Comparando la célula Control con la célula que posee CV+FV se observa que, en cuanto a términos de temperatura se refiere, no existen diferencias significativas. Por tanto, para periodos fríos el tratamiento con vegetación no presenta una diferencia relevante en términos de temperatura., ya que, ambas células presentan el mismo valor de temperatura interna del aire.

En el periodo vespertino, cuando la temperatura exterior comienza a ascender, todas las células de ensayo se encuentran dentro de los límites de confort en el día de frío, es decir, todas presentan temperaturas agradables para el confort humano. Además, el comportamiento de las temperaturas comienza a diferenciarse, de forma que en el registro de temperaturas de la CC presenta una temperatura de 22,59°C a las 17:00h, mientras que en la célula dotada con FV+CV la temperatura es de 21,23°C a la misma hora por lo cual, el atraso térmico entre ellas es el mismo y de 2h. Ante estos datos, se confirma que la disparidad entre ambas células con y sin vegetación para los periodos fríos, no es de un valor desmesurado, ya que esta diferencia es de aproximadamente 1,5°C.

En este mismo periodo, pero analizando ahora el día de calor, apreciamos que solo la célula de ensayo con CV+FV está dentro del límite superior de confort, es decir, el resto de las células de ensayo se encuentran en estrés por calor. La temperatura interna del aire en la célula control alcanzó

los 29,6°C, mientras que en la CV+FV no sobrepasó los 27,5°C. Estamos ante una diferencia de 2,1°C, un grado menos comparado con el estudio que realizaron de Schumann y Tilley (2008) que estudiaron los efectos del uso de la vegetación en cubiertas en Maryland, región Este de Estados Unidos, con el fin de estudiar las temperaturas interiores de los edificios en el mes de Julio. De dicho estudio se dedujo que la vegetación reduce las temperaturas máximas internas diarias hasta en 3,1°C.

Según Docherty y Szokolay (1999) la proporción de calor para el ambiente puede generar infort térmico cuando éste es insuficiente o exagerado. Para estos autores, la sensación de confort puede ser evaluada a través de la piel, ya que la temperatura de ésta se encuentra entre 33-34°C, es decir, si la temperatura ambiente está muy por encima o muy por debajo de ese valor, la sensación probablemente será de infort térmico o malestar térmico. Entonces, cabe destacar que la célula CV+FV con una temperatura de 27,6°C registrados es admitida dentro de estos intervalos de confort térmico.

Si se analiza la Tabla 4 y Tabla 5, en ambos casos se percibe que la menor amplitud térmica se observa en la Célula CV+FV (6,78°C y 8,92°C, para o día de frío y calor respectivamente), con este dato, se percibe que las ganancias y las pérdidas de calor en ella, son más lentas, y es por ello que presenta un mejor desempeño, debido a la propiedad de aislante térmico que la vegetación posee.

La CC en todos los casos presenta la mayor amplitud térmica, debido a la propiedad de algunos materiales de ganar y perder calor rápidamente. Es por eso, que su comportamiento térmico es peor.

Tabla 4 - Tabla resumen de amplitudes térmicas en las temperaturas internas del aire para el día de frío: 10 de julio de 2015

Tª INTERNA DEL AIRE	TBS (°C) CC	TBS (°C)CFV	TBS (°C) CCV	TBS (°C) CCV+FV
T°C Mín.	14,2	14,4	14,8	14,4
T°C Máx.	22,6	21,7	21,4	21,3
$\Delta T^{\circ}C$.	8,4	7,2	6,6	6,9

Fuente: La autora (2015).

Tabla 5: Tabla resumen de amplitudes térmicas en las temperaturas internas del aire para el día de calor: 24 de Septiembre de 2015

Tª INTERNA DEL AIRE	TBS(°C) CC	TBS (°C) CFV	TBS (°C) CCV	TBS (°C) CFV+CV
T°C Mín.	18,4	18,8	19	18,6
T°C Máx.	31,1	29,6	29	27,5
$\Delta T^{\circ}C$.	12,6	10,8	10	8,9

Fuente: La autora (2015).

Los edificios construidos con materiales de construcción convencionales y expuestos a radiación solar absorben el calor que, avanzando por el interior de las fachadas, eleva la temperatura interior. Como consecuencia de este aumento de temperatura dentro del edificio, nos vemos en la obligación de

activar el aire acondicionado para conseguir una temperatura interior cómoda y poder realizar las actividades cotidianas, produciendo un incremento de consumo de energía. Según Dunnet (2005), con el uso de vegetación en fachadas y/o tejados la temperatura interior del aire puede disminuir en $0,5^{\circ}\text{C}$, lo que conllevaría un ahorro de electricidad por reducción de uso de aire acondicionado de un 8%. Por tanto, por medio de los resultados de este trabajo, que el uso de Fachadas verdes combinado con cubiertas verdes, disminuye la temperatura en $2,1^{\circ}\text{C}$, como fue mencionado anteriormente, por lo que con esta combinación sería posible lograr un mayor ahorro en consumo de energía.

Coma et al. (2014), en su trabajo sobre fachadas verdes como sistema pasivo de ahorro de energía en edificios, realizó un estudio con fachadas verdes durante el verano de 2011 en España. Con los efectos que la vegetación ofrece a las envolventes, consiguió una reducción de la temperatura interna del de aproximadamente 1°C . En el presente trabajo, con el uso de fachadas verdes se alcanzó exactamente el mismo resultado para el periodo de primavera estudiado en Brasil.

Según Seixas (2015), en su tesis “Climatología aplicada a la arquitectura”, donde fueron estudiadas en periodos de frío y calor dos células de ensayo (con y sin cubierta verde) iguales a las consideradas en este trabajo, los resultados de análisis de TBS desvelan, para termopares colocados a 1,10m y a 1,70 m. de altura, que ambas células (CC y CCV) presentan temperaturas de aire idénticas, una máxima de 30°C y una mínima de 21°C , con una amplitud térmica diaria de 9°C , para el periodo de calor.

Si se realiza una comparación entre las TBS de la CCV y la CC estudiadas en Seixas (2015) y las mismas células analizadas en este trabajo para los días experimentales de dominio de masa polar atlántica, es decir, un día de frío, dicha autora obtuvo resultados idénticos para ambas y registra temperaturas máximas de 20°C y mínima de 17°C . En el presente trabajo también fueron registradas idénticas temperaturas durante este día para ambas células, cuyos resultados fueron máximas de $22,41^{\circ}\text{C}$ y mínima de $14,3^{\circ}\text{C}$. Por consiguiente, se registra una desigualdad de $2,4^{\circ}\text{C}$ para las temperaturas máximas. Si analizamos ahora el día experimental de calor, Seixas (2015) obtiene resultados idénticos para ambas células nuevamente y registrando temperaturas máximas de 30°C y mínima de 21°C . En el actual trabajo se registró una diferencia de $0,62^{\circ}\text{C}$ entre ambas células en las temperaturas máximas.

A continuación, en la tabla 6 y 7 muestran el resultado del cálculo de las horas de discomfort, grados-hora ($^{\circ}\text{Ch}$), por frío y por calor, para los días estudiados. En la Tabla 6, presenta $^{\circ}\text{Ch}$ para el día de frío, donde no se registra ningún Grado-hora de incomfort por calor, por el contrario, se observan varios grados-hora de discomfort por frío, que el máximo valor (47°Ch) se registra en la célula de ensayo control y el valor mínimo (41.41°Ch) en la célula que posee cubierta verde, seguida a la célula con fachadas verdes y cubierta verde (43.69°Ch).

Tabla 6 – Grado-Horas por desconfort para el día crítico experimental frío (valores en °Ch)

GRADOS-HORAS POR DESCONFORT DÍA 10-07		
CASOS	CALOR	FRÍO
CC	0,00	-47,26
CFV	0,00	-44,19
CCV	0,00	-41,41
C FV+CV	0,00	-43,69

Fuente: La autora (2015).

La tabla 7 expone el calculo de grado-horas para el día crítico de calor. En la única célula de ensayo en la que no se registra ninguna hora de desconfort por calor, es la célula que posee Fachadas verdes + cubierta verde y el valor más elevado de grados-hora por desconfort en calor se observa en la célula de ensayo Control (4,98°Ch). En el caso de horas-grado de inconfort por frío, el máximo valor (11.48°Ch) se registra en la célula de ensayo Control. Las células CCV y la CFV presentan un valor similar de aproximadamente 8.5°Ch. La célula de ensayo con CFV+CV muestra 9°Ch de desconfort por frío.

Tabla 7 - Grados-horas de desconfort día crítico experimental calor (°Ch).

GRADOS-HORAS DESCONFORT		
CASOS	CALOR	FRÍO
CC	4,98	-11,48
CFV	1,11	-8,66
CCV	2,39	-8,53
C FV+CV	0,00	-9,21

Fuente: La autora (2015).

La célula de ensayo CC posee mayor desconfort tanto por frío como por calor, mientras que las células experimentales que poseen vegetación en alguna de sus envolventes presenta menos horas de inconfort durante el día.

5.3. Comportamiento térmico: Temperaturas Superficiales Internas (TSI) de fachadas Norte y cubiertas

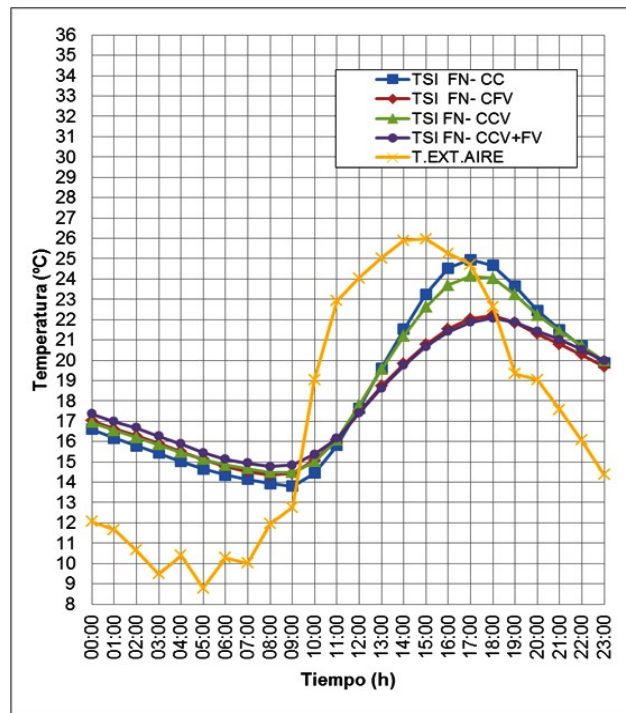
Este capítulo abordará la idea propuesta en el presente trabajo como hipótesis 2, demostrando que la incorporación de cubierta verde y fachada verde combinados en sistemas constructivos puede ser más eficiente en relación a la alternativa de uso de solo cubierta verde o fachada verde, no solo para mejorar el comportamiento de ambientes internos (temperaturas superficiales), sino que consecuentemente favorecerá al aumento de la eficiencia energética.

Las envolventes de los edificios, tanto las cubiertas como las fachadas, influyen directamente en los intercambios de calor con el exterior dependiendo de las características físicas de los materiales empleados en su construcción, por lo que deben ofrecer aislamiento térmico a éstos. Por eso, en este apartado serán discutidos los resultados obtenidos en las superficies interiores de las células de ensayo, concretamente en las fachadas Norte (una de las que más horas de radiación solar recibe) y en las cubiertas.

- ***Comportamiento térmico en Fachadas Norte para los días críticos experimentales de frío y de calor.***

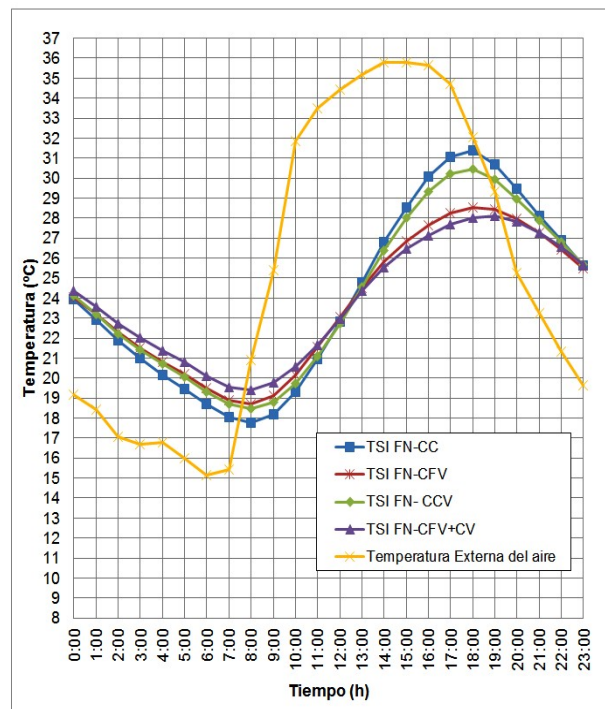
En las figuras 25 y 26 se muestra el comportamiento térmico de las fachadas Norte en las cuatro células de ensayo como respuesta a un día de frío y un día de calor.

Figura 25. Temperatura Superficial Interna de las fachadas Norte para el día crítico experimental de frío 10 de julio de 2015



Fuente: La autora (2015).

Figura 26. Temperatura Superficial Interna de las fachadas Norte para el día crítico experimental de calor. 24 de septiembre de 2015



Fuente: La autora (2015).

Las temperaturas superficiales internas de las fachadas Norte, tal y como se muestra en la Figura 24 (día de frío), durante las primeras horas del día, cuando se registran las temperaturas mínimas externas, son similares, existiendo una diferencia entre la CC y la CFV+CV de aproximadamente 1°C y de 6°C respecto a la temperatura externa.

Sin embargo, en el gráfico del día crítico de calor, se ve reflejada una diferencia de casi 2°C entre la CC y la CFV+CV. En relación a la temperatura externa del aire, existe retraso térmico en la temperatura superficial interna de aproximadamente 2h.

Cuando la temperatura externa comienza a subir, el comportamiento de las células de ensayo empieza a diferenciarse, registrándose en la CC la temperatura interna superficial máxima de la fachada Norte con 25°C a las 17:00h y de 31,4°C a las 18:00h, durante el día de frío y el día de calor respectivamente. Por el contrario, observando el periodo vespertino, en los dos días críticos, las temperaturas más bajas son registradas en las CFV+CV y la CFV, donde nos encontramos con una diferencia de 2,6°C con respecto a la CC y 7,7°C respecto a la temperatura exterior para el día de calor. La diferencia entre ellas (CFV+CV y CC) en el día de frío es de 3°C.

A continuación, se exponen (Tabla 8 y 9) las tablas resumen de las amplitudes térmicas registradas en las células ensayadas para los días estudiados.

Tabla 8 - Cuadro resumen de amplitudes térmicas en Fachadas Norte para día crítico experimental de calor (24/09/2015)

FACHADAS NORTE	TSI (°C) CC	TSI (°C) CFV	TSI (°C) CCV	TSI (°C) CFV+CV
T°C Mín.	17,8	28,5	30,4	28,1
T°C Máx.	31,4	18,7	18,5	19,4
ΔT°C.	13,6	9,8	11,9	8,7

Fuente: La autora (2015).

Tabla 9 - Cuadro resumen de amplitudes térmicas en Fachadas Norte para día crítico de frío (10/07/2015)

FACHADAS NORTE	TSI (°C) CC	TSI (°C) CFV	TSI (°C) CCV	TSI (°C) CFV+CV
T°C Mín.	13,8	14,3	14,5	14,8
T°C Máx.	25,0	22,2	24,1	24,1
ΔT°C.	11,2	7,9	9,6	9,3

Fuente: La autora (2015).

En ellas se percibe que las mayores amplitudes térmicas son registradas en la CC, mientras que las menores se contemplan en la CFV+CV. Por tanto, puede ser afirmado que la CFV+CV presenta un mejor comportamiento térmico.

Haciendo una confrontación en los días experimentales de frío y de calor entre las TSI de las fachadas Norte para la CCV y la CC estudiadas, en Siexas (2015) se obtuvieron diferencias de 0,5°C

para ambos días, mientras que para las analizadas en este trabajo. La diferencia entre ellas es de 1°C para ambos días. A la vista de estos resultados y comparados éstos con la célula CFV+CV estudiada, se manifiestan en ésta mejores resultados, 28,1°C, es decir 2,5°C menos que las anteriormente mencionadas.

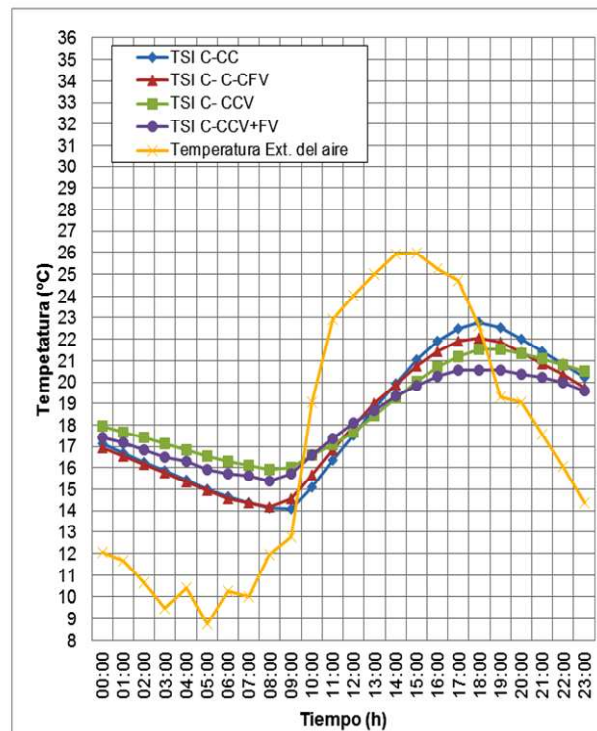
Wong et al. (2010), realizó una estimación del impacto térmico en ocho sistemas diferentes de fachada verdes para clima tropical, en uno de los modelos utilizados y el más acorde con el utilizado en este trabajo, afirma que no existió una diferencia significativa en la reducción de la temperatura, especialmente en el periodo nocturno, sin embargo, existe una diferencia de 4°C en la temperatura superficial durante el día. Estos hechos son semejantes (diferencia de 3,4°C entre CC y CFV+CV) a los resultados obtenidos en el presente trabajo realizado durante la primavera de São Carlos, Brasil.

Según Peck et al. (1999), la incorporación de vegetación en cubiertas o fachadas, produce inmediatamente sobre el edificio una zona de sombra capaz de reducir la temperatura exterior de las superficies en 5,5°C. En este caso, si hacemos una comparación entre la temperatura externa del aire y la temperatura interna superficial, se observa una reducción de 7,7°C.

- ***Comportamiento térmico en cubiertas para los días críticos experimentales de frío y de calor.***

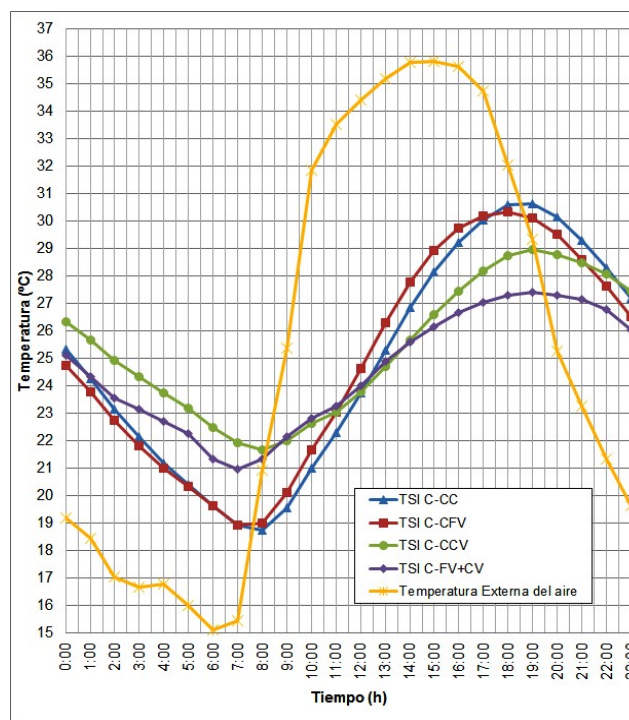
A continuación (Figura 27 y Figura 28), se muestran los datos de temperatura obtenidos para el estudio de las cubiertas, superficie en la se ha percibido mayor diferencia de temperatura entre las células de ensayo, tanto para el día de frío como para el día de calor.

Figura 27. Temperatura Superficial de las Cubiertas para el día crítico experimental de frío (10 de julio de 2015)



Fuente: La autora (2015).

Figura 28. Temperatura Superficial de las Cubiertas para el día crítico experimental de calor (24 de septiembre de 2015)



Fuente: La autora (2015).

Durante el periodo de la mañana, cuando son registradas las temperaturas externas más bajas, para ambos días, las células de ensayo que presentan menores temperaturas en la superficie interna de las cubiertas son las que poseen tejado cerámico, es decir, CFV y CC. Las que registran mayores temperaturas son aquellas con cubierta verde, es decir, CCV y CCV+FV, que las diferencia 2°C del resto de células para el día de calor y 1°C para el día de frío, lo que indica una dificultad para perder calor a la atmósfera por dicha superficie. Por lo que, para climas fríos, puede ser una buena alternativa no solo para reducir el consumo de energía por calefacción sino también como una forma de amenizar los ambientes internos.

En el periodo de la tarde, se produce un aumento de la temperatura externa, lo que implica un aumento de las temperaturas internas superficiales. Nuevamente, las células que presentan las temperaturas más altas, son las que no poseen cubierta verde, es decir CC y CFV. La célula que posee la menor temperatura es la CFV+CV, con una diferencia respecto de la CC de 2,2°C y 3,2°C para el día crítico de frío y de calor respectivamente.

El desfase horario entre los valores máximos y mínimos de las temperaturas se conoce como retraso térmico. Se dice que un material posee más o menos inercia térmica cuanto mayor o menor es su atraso y amortiguación. El retraso térmico para el día de calor estudiado es de 4h para las CFV+CV y la CCV, igual valor que se observa en el día de frío, mientras que las células construidas con tejados cerámicos registran un atraso térmico de 3h.

Las siguientes tablas (tabla 10 y 11) contienen información sobre las amplitudes térmicas registradas en las cubiertas de cada una de las células de ensayo para los dos días estudiados.

Tabla 10 - Resumen de las amplitudes térmicas en las temperaturas registradas en las cubiertas día crítico experimental de frío, 10 de julio de 2015

CUBIERTAS	TSI (°C) CC	TSI (°C) CFV	TSI (°C) CCV	TSI (°C) CFV+CV
T°C Mín.	14,1	14,2	15,9	15,4
T°C Máx.	22,8	22,1	21,5	20,6
$\Delta T^{\circ}C$.	8,7	7,9	5,6	5,2

Fuente: La autora (2015).

Tabla 11 - Resumen de las amplitudes térmicas en las temperaturas registradas en las cubiertas día crítico experimental de calor, 24 de septiembre de 2015

CUBIERTAS	TSI (°C) CC	TSI (°C) CFV	TSI (°C) CCV	TSI (°C) CFV+CV
T°C Mín.	18,7	18,9	21,7	21
T°C Máx.	30,6	30,3	28,9	27,1
$\Delta T^{\circ}C$.	12	11,4	7,2	6,4

Fuente: La autora (2015).

De ellas se deduce que las menores amplitudes térmicas para ambos días se registran en la célula de ensayo FV+CV, razón por la que presenta un mejor comportamiento térmico. Las mayores amplitudes fueron registradas en la CC, lo que muestra mayor rapidez en ganar y perder calor. De acuerdo con otros estudios ya realizados, Correa (2001), comparando experimentalmente un sistema de cubierta verde con uno tradicional, concluye que la cubierta verde es energéticamente más favorable en las estaciones de invierno y verano, debido a la regulación de temperatura a través de los procesos naturales de la vegetación. Vecchia (2005), utilizando una cubierta con características leves como cubierta verde, registró diferencias de hasta 8°C en relación con la temperatura ambiente (34°C para el día estudiado) y una amplitud térmica interna de 9.2°C. Con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se testifica que, si adicionamos, además de la cubierta verdes, fachadas verdes, se obtiene un mejor comportamiento, lo que implica una mejor regulación de los flujos térmicos.

Andrade (2007) y Morais (2004) consiguieron un desempeño térmico más confortable en edificaciones con uso de cubiertas verdes, lo que implica una atenuación de las fluctuaciones térmicas, así como una protección de sus envolventes. Fioretti et al. (2010) estudió el comportamiento térmico y energético de una cubierta verde intensiva en verano, por ser la estación del año que presenta mejores resultados para la zona del Mediterráneo. Así, verificó que el uso de este tipo de construcciones atenúa la radiación solar de forma que disminuye la cantidad de calor que entra en el edificio y a su vez, reduce el consumo de energía.

Comparando los datos obtenidos en las TSI de las cubiertas para la CCV y la CC en Seixas (2015), y el actual trabajo para los días experimentales de frío y de calor, en el primero, se obtuvieron diferencias de 0,5°C y 2°C en las temperaturas superficiales máximas registradas en las cubiertas para el día de frío y de calor respectivamente, mientras que para las registradas en el actual trabajo la diferencia fue de 1,3°C y 1,7°C para los mismos días respectivamente.

Comparados ambos resultados con la CFV+CV estudiada en el presente proyecto de investigación, de nuevo obtenemos mayores diferencias (2,2°C y 3,2°C frío y de calor respectivamente) lo que consecuentemente conduce a mejores resultados térmicos.

5.4. Efecto de la ventilación natural en las temperaturas superficiales internas en un día crítico experimental de calor (verano)

La arquitectura sostenible es aquella que considera las condiciones climáticas y ambientales en el acondicionamiento del diseño arquitectónico en varios niveles: en un primer nivel, se encuentran los edificios eficientemente energéticos que no incluye variables ecológicas, en un segundo nivel, están aquellos cuyo balance energético global incluye no sólo la fase de vida útil del edificio, sino todo su

proceso constructivo, y en un tercer nivel y más completo se encuentran edificaciones que no sólo se preocupan de preservar balances energéticos buenos, sino también en adecuarse al medio en un sentido más extenso, es decir, aquellas que se introducen en el paisaje, preocupadas por el mantenimiento de recursos naturales limitados, como por ejemplo, incorporación de vegetación y el ahorro de agua. Sistemas complementarios aprovechados en beneficio de la edificación y perfectamente compatibles con ahorro energético del edificio y en la obtención de las condiciones de confort deseadas (CELIS D'AMICO, 2000)

Para los usuarios de un edificio, la calidad térmica depende de los intercambios de calor del cuerpo humano con el ambiente que le rodea, por eso, debe ser considerado tanto, las transferencias de calor que se originan, así como las respuestas psicológicas y sensoriales. En climas cálidos, mantener la calidad térmica de los ambientes es un problema esencial, ya que altos niveles de humedad dificultan la desaparición de calor del cuerpo humano, siendo la ventilación natural una estrategia importante para el acondicionamiento pasivo de ambientes internos para este tipo de clima (GRIFFIN, 1999).

Según Lambert y Ghisi (2005) la ventilación natural es una de las estrategias bioclimática más importantes en Brasil después del sombreado, ya que la mayoría de las ciudades brasileñas necesitan de ventilación natural como principal estrategia en el verano y en ocasiones durante todo el año. Se define la ventilación como una estrategia de enfriamiento natural del ambiente construido a través de la sustitución de aire interno (más caliente) por el aire externo (más frío). Las soluciones arquitectónicas normalmente utilizadas son ventilación cruzada, ventilación de la cubierta y ventilación del suelo sobre la edificación.

Para la realización de este trabajo fue utilizada la ventilación cruzada, mediante la abertura de ventanas y puertas por un periodo de tiempo determinado como muestra la Figura 29. En dicho periodo los vientos registraron una velocidad máxima de 2,6m/s con una dirección de 322,8 grados.

Figura 29. Esquema de ventilación cruzada en planta



Fuente: Lambert y Ghisi (2005).

La ventilación natural ocurre cuando existe desplazamiento del aire a través de la edificación, por medio de las aberturas que funcionan como entrada y salida. Por tanto, es necesario que las aberturas estén correctamente situadas y dimensionadas, proporcionando un flujo de aire adecuado. La ventilación puede ocurrir de dos maneras, por la acción de viento o por la diferencia de densidad a través del “efecto chimenea” (FROTA; SCHIFFER, 2001).

El ahorro de energía es un tema muy actual, no solo por el ahorro económico, sino también como disminución de emisiones de gases a la atmosfera. Por lo que, hoy en día, la tendencia es incorporar en los edificios sistemas pasivos que acompañan las metodologías activas (MIOTTO; GARCIA, 2011).

Givoni (1992), esclarece que el clima interno de los edificios no acondicionados, reacciona en función de la variación climática externa y de sus ocupantes, es decir, es común en cualquier edificio no acondicionado, que la temperatura interna varíe, por ejemplo, desde los 20°C en el periodo matutino hasta 26°C en el periodo vespertino en época verano. La velocidad del aire interno para edificios con ventilación cruzada es siempre muy próxima a 2 m/s.

En regiones de climas cálidos el movimiento del aire es significativo para el bienestar humano, además de para los cuerpos que componen el espacio interno de una edificación, ya que la ventilación también ayuda a reducir la temperatura superficial de los cuerpos (RIVERO, 1986).

La velocidad del aire es una variable climática que depende de las condiciones del viento exterior, así como de la diferencia de presión, debido a la orientación y configuración externa del edificio, tamaño, localización y aberturas. El movimiento del aire por fuerza térmica será insuficiente para crear velocidades necesarias para el confort térmico en climas cálido-húmedo (GRIFFIN, 1999). Cabe mencionar, la dificultad en encontrar trabajos científicos sobre el uso de ventilación natural combinada con envolventes vegetales.

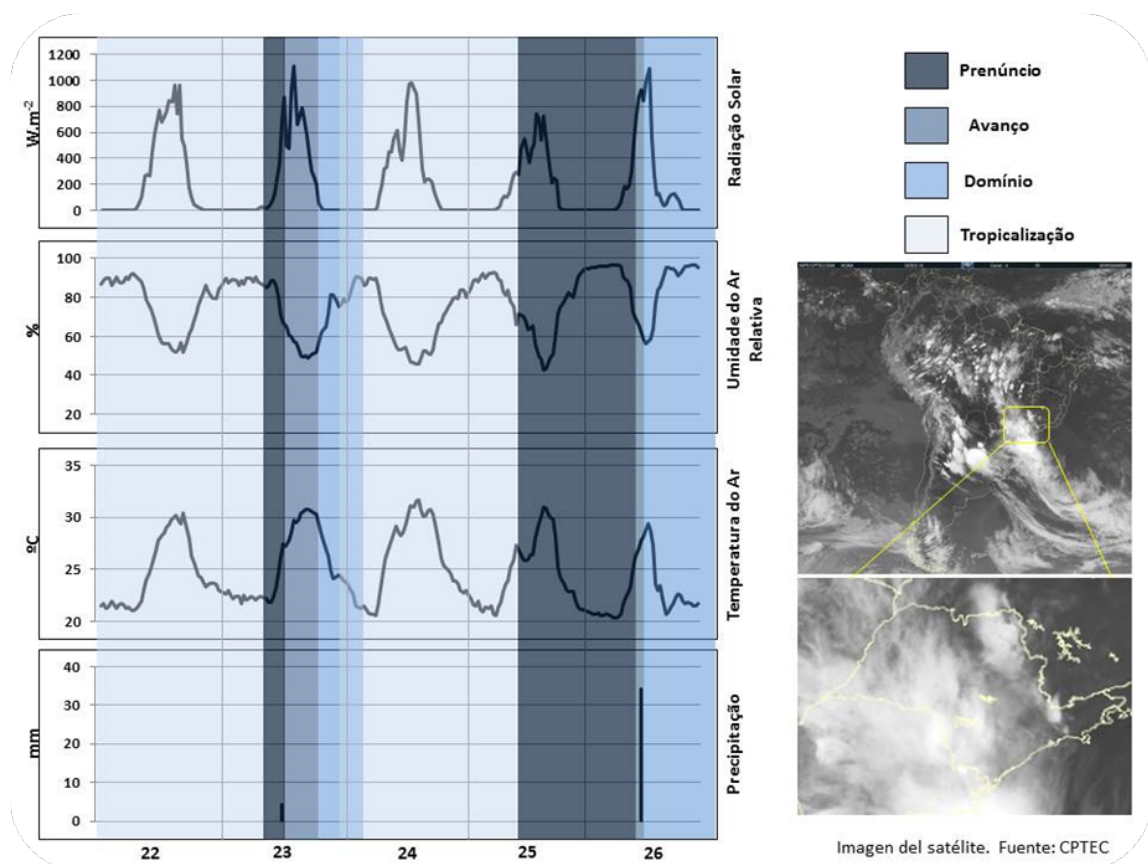
Sunakorn y Yimprayoon (2011) realizaron un experimento con biofachadas, utilizando la misma especie de planta que la metodología de este artículo describe, afirman que el uso vegetación con ventilación natural mejoró el comportamiento térmico reduciendo la temperatura, tanto por la noche como por el día. Además, sostienen que cuando la velocidad del aire aumenta, la ganancia de calor durante el día se reduce. Asimismo, enuncia que la colocación de este tipo de plantas en las ventanas no disminuye la velocidad del aire, ya que inesperadamente, se registró una velocidad del mismo incluso mayor que en un caso sin biofachadas. Ese trabajo concluye que aplicación de biofachada es capaz de mejorar comportamiento térmico durante el día debido la acción del sombreado, fotosíntesis y la evapotranspiración, pero en el periodo nocturno, por el contrario, las fachadas vegetales no ayudan en la disminución de la temperatura, ya que obstruyen la disipación de calor, sin embargo, ventilación sería una opción para resolver este problema.

Para el estudio de este capítulo, fue elegido un día crítico experimental de calor (verano) ocurrido durante el episodio climático del 21 al 26 de diciembre de 2015. El día elegido como experimental fue el día 24 de diciembre, en el cual se registró una temperatura máxima de 31.6°C, es decir, una

temperatura superior a 26.9°C que registra la serie de datos histórica Climatológica de 1961-1990 publicada por el Departamento Nacional de Meteorología do Ministerio de Agricultura e Reforma Agraria de Brasil.

En este episodio representado en la Figura 30, el día 22 de diciembre estuvo sobre la transición de un sistema de convergencia de humedad, caracterizado por temperaturas elevadas por encima de 30°C. Durante los días 23 y 24, se observa como el sistema frontal asociado con la convergencia de humedad se intensifica causando inestabilidad en la región del estado de São Paulo, con temperaturas altas durante el día y aumento de la humedad relativa durante la noche. Al día siguiente, es notable el incremento de temperatura alcanzando valores por encima de 31,5°C con ausencia de nubosidad en la mayor parte del día, lo que intensificó la entrada de la radiación solar. Los valores térmicos mínimos registraron valores encima de 20°C. En los últimos días, (24 y 25 de diciembre de 2015), el avance del sistema atmosférico causó la nubosidad y precipitaciones acumuladas por encima de 30 mm.

Figura 30. Análisis climático. Episodio del 21 al 25 septiembre 2015.



Fuente: la autora (2016).

5.4.1. Estudio de temperaturas internas del aire (TBS) con ventilación natural

Los límites de confort fueron obtenidos a partir de la siguiente ecuación indicada por ASHRAE-Standard 55-2013, la cual establece una metodología de cálculo de los límites de confort para cada día del año, a partir del grado de satisfacción de personas en edificaciones naturalmente ventiladas, como se detalla en la metodología de este trabajo.

Para el análisis del comportamiento térmico de este capítulo fueron calculados los límites de confort mediante las siguientes ecuaciones (Ec. 5 y Ec. 6) y cuyos resultados se muestran a continuación.

$$\text{Límite superior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{pma(out)} + 21.3 = 28.87^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec.7})$$

$$\text{Límite inferior 80\% satisfechas} = 0.31 t_{pma(out)} + 14.3 = 21.87^{\circ}\text{C} \quad (\text{Ec.8})$$

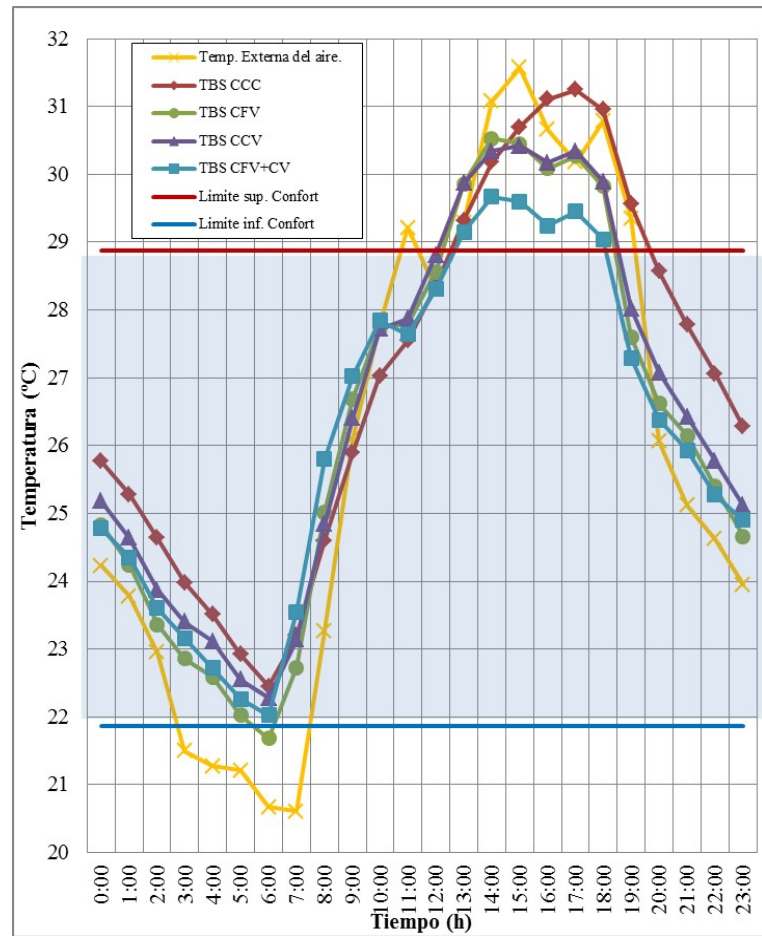
En la Figura 31, se muestra el comportamiento térmico de las células de ensayo ventiladas, junto con la temperatura externa del día estudiado y los límites de confort. Observando el periodo de la mañana, todas las células de ensayo se encuentran dentro de la zona de confort térmico, presentando la temperatura más baja y la más cercana al límite inferior del rango de confort, la célula con fachadas verdes (21.7°C a las 6:00h), y la más alta en la célula control (22.45°C a las 6:00h).

Tabla 12- Grados-horas de desconfort (°Ch).

GRADOS-HORAS DESCONFORT		
CASOS	CALOR	FRÍO
CC	39,75	0
CFV	32,37	0
CCV	33,55	0
C FV+CV	26,96	0

Fuente: La autora (2015).

Figura 31. Evolución de las temperaturas internas del aire de las células de ensayo con ventilación.



Fuente: La autora.

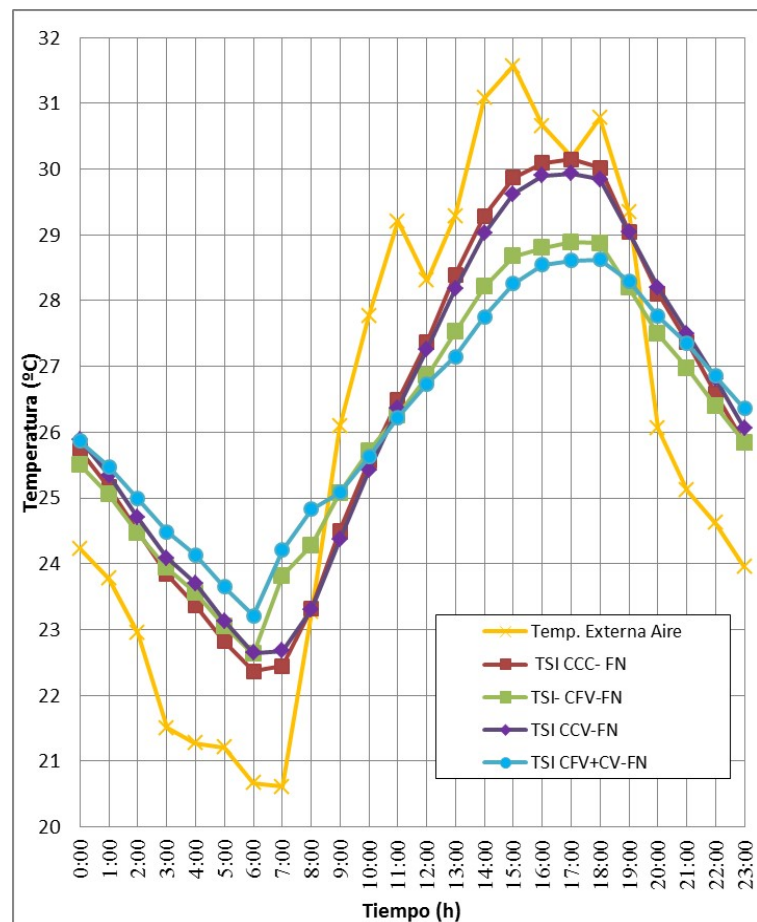
A pesar del efecto de sombreado implantado en las edificaciones y del efecto de humidificación del aire, conforme muestra la Figura 31 se observa que, en el periodo de la tarde, momento donde se registran las temperaturas más altas, todas las temperaturas internas del aire están fuera del rango de confort térmico calculado. Las temperaturas mínimas registradas se dan en la célula que posee fachadas verdes y cubierta ajardinada ($T^{\circ}\text{máx}$ 26,67°C a las 14:00h.), pero, aun así, dicha célula también se encuentra fuera de la zona de confort.

5.4.2. Análisis del comportamiento térmico mediante estudio de Temperaturas superficiales Internas de las fachadas Norte

La Figura 32 muestra las temperaturas internas superficiales de las fachadas Norte para cada una de las células de ensayo. En el periodo de la mañana, la temperatura más baja es registrada en la célula de ensayo Control (construida con materiales convencionales sin vegetación), mientras que en la célula

con cubierta verde y en la célula con fachadas verdes, se registra aproximadamente la misma temperatura, siendo ésta de 22,6°C a las 6:00h. Por el contrario, se observa en la célula con cubierta ajardinada y fachadas vegetales una temperatura máxima que la diferencia en 1°C de las dos anteriores. Cuando la temperatura externa comienza a subir, también lo hacen las temperaturas superficiales de las fachadas Norte, hasta que alcanzan sus máximas. Las máximas superficiales son registradas en las células desprovistas de vegetación en sus fachadas Norte, es decir, la célula control y la que posee cubierta verde. Ambas alcanzan los 30°C a las 17:00h, que además coincide con la temperatura externa en esa hora.

Figura 32. Evolución de las temperaturas internas superficiales de las fachadas Norte de las células de ensayo con ventilación.



Fuente: La autora.

Por el contrario, las células de ensayo que tienen fachadas vegetales (Célula fachadas verdes y célula cubierta verde + fachadas verdes), presentan las temperaturas superficiales internas más bajas, siendo ésta de 28,7°C a las 18:00h. Existe una diferencia de aproximadamente 2°C con la temperatura externa a la misma hora (30.78°C). La menor amplitud térmica también es registrada en estos

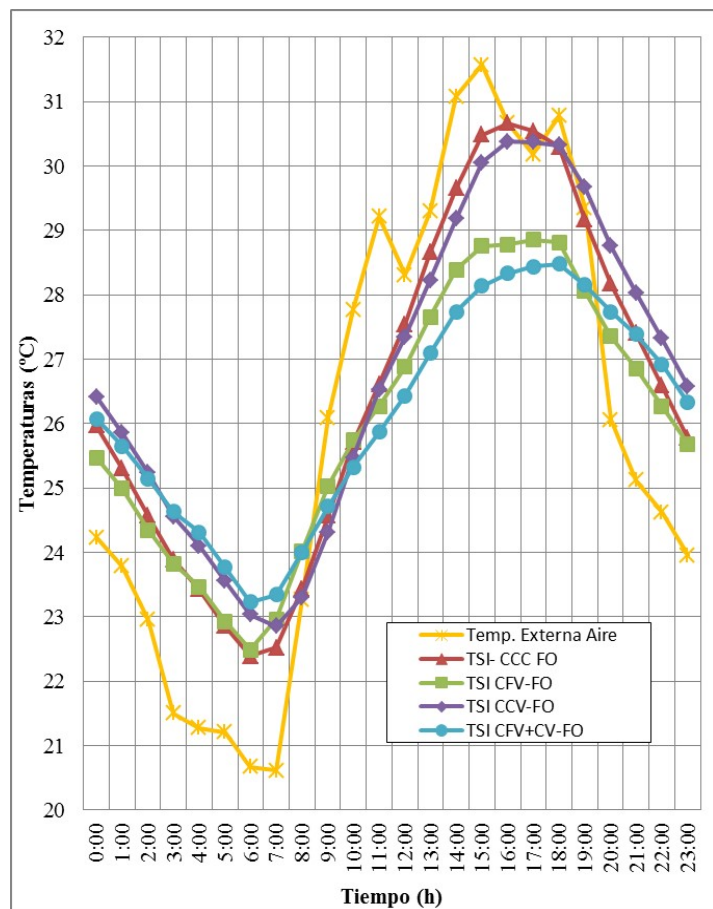
prototipos de ensayo, siendo su valor de aproximadamente $5,4^{\circ}\text{C}$. El retraso térmico es de 3 horas. Por lo tanto, en estas dos células se distingue un mejor comportamiento térmico que en las células desprovistas de vegetación en sus fachadas.

5.4.3. Análisis del comportamiento térmico mediante estudio de las Temperaturas Superficiales Internas de las fachadas Oeste

La Figura 33 muestra la evolución de las temperaturas internas superficiales de las fachadas Oeste.

Durante las primeras horas del día el comportamiento de las fachadas Oeste no presenta ninguna característica destacable. Todas ellas presentan unas temperaturas próximas a los 23°C . Existe una diferencia de aproximadamente 3°C con la temperatura externa.

Figura 33. Evolución de las temperaturas internas superficiales de las fachadas Oeste de las células de ensayo con ventilación natural.



Fuente: La autora.

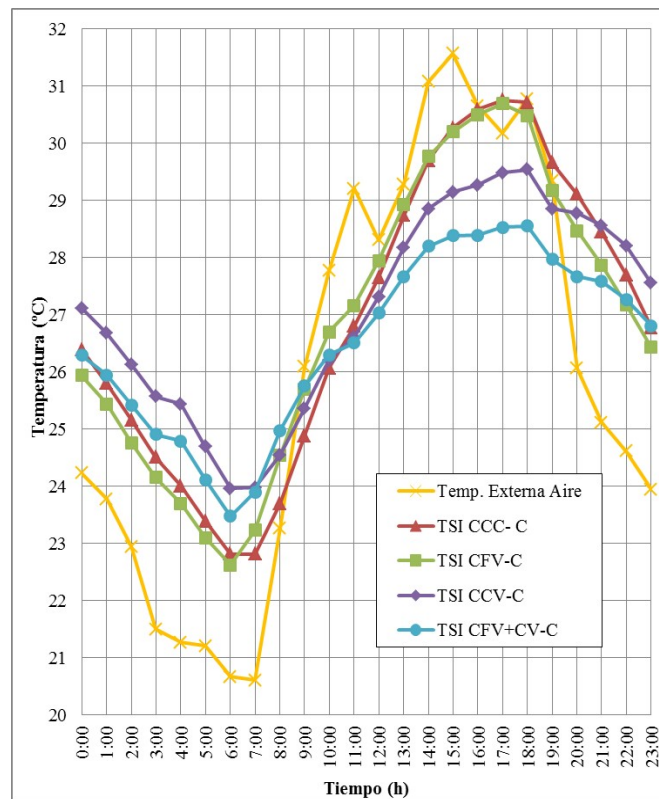
En el periodo de la tarde, se percibe que las temperaturas de las fachadas Oeste que no gozan de vegetación, alcanzan la misma temperatura que la externa, en torno a los 30,5°C a las 17:00h. Las células con vegetación en las fachadas (fachadas verdes y cubierta verde+ fachadas verdes) registran las temperaturas más bajas. La célula con fachadas verdes registra una temperatura de 28,9°C a las 17:00h. La célula con cubierta verde y fachadas verdes presenta la temperatura más baja 28,5°C a las 18:00h.

Por tanto, se mantiene nuevamente, que la célula de ensayo que mejor comportamiento térmico presenta, es la célula con cubierta verde y fachadas verdes, no solo por el hecho de registrar las temperaturas más bajas, sino también por tener la menor amplitud térmica (5,5°C), por tanto, mayor dificultad para intercambiar calor con el exterior y mayor retraso térmico (3h).

5.4.4. Análisis del comportamiento térmico mediante estudio de las Temperaturas Superficiales Interna de las cubiertas

La Figura 34 muestra las temperaturas internas superficiales registradas en las cubiertas de las cuatro células de ensayo. En ellas se observa, en el periodo en el que registran las temperaturas mínimas externas (20,6°C a las 7:00h) que la célula que mantiene la temperatura más alta en su cubierta, es la que posee cubierta ajardinada (24°C a las 6:00h), así como la que posee vegetación tanto en fachadas como en la cubierta (24°C a las 7:00h). Existe una diferencia de temperatura con el exterior de aproximadamente 4°C.

Figura 34. Evolución de las temperaturas internas superficiales de las cubiertas de las células de ensayo con ventilación natural.



Fuente: La autora.

Las temperaturas superficiales más bajas son registradas en las células sin vegetación con un registro de 22,6°C a las 6:00h aproximadamente. La diferencia con la temperatura externa mínima registrada es de aproximadamente 2°C.

Una vez más, la menor amplitud térmica es registrada en la célula con fachadas verdes y cubierta verde, siendo ésta de 5°C y con un retraso térmico de 4h con respecto a la máxima externa. A ésta le sigue la célula con cubierta verde, con una amplitud térmica de 5,5°C y un retraso térmico de 4h. Respecto a las células con vegetación en las cubiertas, cabe destacar que alcanzan las temperaturas externas e incluso es superada por ambas a las 17:00h, donde se registran temperaturas internas superficiales de las cubiertas de 30.7°C, medio grado más elevadas que la temperatura externa.

A pesar de que la ventilación es un mecanismo por el cual se igualan las temperaturas internas a las externas, percibimos que en las superficies que poseen vegetación, las temperaturas son inferiores al resto. Cuando no existe una protección vegetal las ganancias de calor por radiación aumentan las temperaturas internas superficiales, lo que a su vez calienta las temperaturas internas del aire. La ventilación interfiere en las temperaturas superficiales internas. Las superficies que poseen vegetación presentan un menor sobrecalentamiento, mientras que las que no poseen vegetación alcanzan e incluso superan las temperaturas externas.

6. CONCLUSIONES

Analizado los resultados obtenidos para el día crítico de calor, se puede concluir que el uso de fachadas y cubiertas verdes combinadas es beneficioso para impedir ganancias excesivas de calor provocadas por la radiación solar. La vegetación por su capacidad de generar sombra disminuye la absorción de calor, tanto por radiación como por conducción hacia el interior de los edificios, debido a la disminución del impacto de la radiación directa. Además, reduce la temperatura del aire adyacente al muro. Durante este día, las mayores diferencias entre las temperaturas máximas internas del aire entre las células con y sin vegetación fue de 2°C para las temperaturas internas del aire y en torno a 3°C en el caso de las temperaturas superficiales, por tanto, el uso de vegetación en la arquitectura es una técnica viable capaz de amortiguar fluctuaciones térmicas y con varias posibilidades de uso para el tipo de clima estudiado, que aporta, además de beneficios ambientales, beneficios térmicos internos capaces de mejorar el confort térmico para sus ocupantes.

Considerando el análisis del día crítico de frío, la diferencia entre para los valores de temperatura del aire fue de 1°C y de 2.2°C para valores de temperaturas superficiales, se concluye pues, que la vegetación es capaz de reducir las variaciones de temperaturas internas, ya que la célula FV+CV es capaz de mantener una temperatura más estable en el ambiente interior, pues durante las primeras horas del día, cuando se registran las temperaturas externas más bajas, se observan las temperaturas internas más altas. Para este día, la diferencia entre las células con y sin vegetación en las horas más frías registradas no es demasiado significativa, por lo podría ser discutido este tipo de edificaciones para localizaciones con temperaturas bajas.

La incorporación de vegetación combinada en cubiertas y fachadas produce una mayor atenuación de los valores de la temperatura interna en relación con la temperatura externa. La amortiguación de la onda térmica (diferencia entre temperatura externa e interna) a lo largo del día es mayor con la utilización del sistema combinado de cubiertas y fachadas verdes, ya que presenta una mejor capacidad de respuesta térmica en dicha célula ensayada, pues en todos los casos responde con menores amplitudes térmicas. Asimismo, es un sistema más eficiente, no solo para mejorar el comportamiento térmico de ambientes internos, sino que consecuentemente favorecerá al aumento de la eficiencia energética en relación a la alternativa de uso de solo cubierta verde o fachada verde.

Del análisis del comportamiento térmico con cubierta o fachadas verdes, se deduce que el uso de vegetación en las fachadas presenta menor temperatura en ambos días estudiados, por lo que para el día de calor, cuyo objetivo es mantener el edificio fresco durante los veranos de la zona estudiada, el resultado es favorable al confort térmico interno como era esperado.

Sin embargo, para el invierno, la finalidad de las edificaciones es mantener el calor y que la temperatura se aproxime lo máximo posible a las necesidades del usuario, por tanto, según los resultados obtenidos y para el tipo de clima estudiado, sería conveniente un diseño que sea consecuente con las condiciones climáticas de la zona. La instalación de fachadas verdes, no sería apropiada debido a que éstas reducen la temperatura interna. La existencia de diferentes especies de plantas con diferentes tipos de hojas, nos permite el uso de un tipo de planta de hoja caduca que se mantenga durante el verano, protegiendo de la radiación solar y pierda su hoja durante el invierno, de forma que las envolventes de la edificación reciban radiación solar directa y de esta forma caliente el ambiente interno.

Del cálculo de los grado–horas para el día crítico de calor, revela que la única célula de ensayo que no registra ninguna °Ch de discomfort por calor, es la célula que posee Fachadas verdes + cubierta verde, sin embargo, el valor más elevado de °Ch por discomfort en calor se observa en la célula de ensayo Control (4,98°Ch).

Podría ser discutido si el uso de vegetación es mejor que un aislamiento común. El uso de aislantes térmicos no tiene el mismo comportamiento que las plantas, ya que por carecer de masa térmica no son capaces de alterar la inercia de los materiales, por lo que no existiría variación ni en el atraso ni en la amortiguación térmica. Los beneficios de las plantas no solo radican en su capacidad de alterar la cantidad de radiación solar recibida y dar sombra, sino que los procesos fisiológicos de éstas, como respiración, fotosíntesis y evapotranspiración, entre otros, aportan beneficios no solo a los ambientes internos, sino también al medio ambiente, resfriándolo y limpiándolo, para brindar una mejor calidad del aire a los centros urbanos.

Por tanto, se concluye que el uso de vegetación en obras de edificación para clima tropical de altitud protege las envolventes de posibles ganancias. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que las hipótesis planteadas fueron alcanzadas, comprobando que el uso de vegetación combinado en fachadas y cubiertas contribuye a la mejora del confort térmico, favoreciendo así las condiciones térmicas internas en periodos de mayor o menor temperatura externa.

REFERÊNCIAS

- ACOSTA, A.C. **Sistemas vegetales verticales**: estudio de los efectos de la integración arquitectónica de sistemas vegetales verticales y propuesta de uso como técnica pasiva de ahorro de energía en el clima continental mediterráneo. 2001. Tesis (Master) – Escuela Universitaria de Arquitectura Técnica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2011.
- AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. **Solar Energy**, v.70, n.3, p.295-310, 2001.
- ALEXANDRI, E.; JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v.43, n.4, p.480-493, Apr. 2008.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55 – 1992**: Thermal comfort. Atlanta: ASHRAE, 1992.
- _____. **Determining acceptable thermal conditions in occupant-controlled naturally conditioned spaces**. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- ANDRADE, N.C. **Desempenho térmico de cobertura verde utilizando a grama Brachiaria humidicola na cidade de São Carlos-SP**. 2007. 120p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- ARAÚJO, S.R. **As Funções dos telhados verdes no meio urbano, na gestão e no planejamento de recursos hídricos**. Rio de Janeiro: Soropédica. 2007
- ARAÚJO, C. **Transmissão de calor**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.
- ARRAU, C.P.; PEÑA, M.A. **The Urban heat island (UHIs)**. 2015. Disponible en: <<http://www.urbanheatislands.com>>. Acceso en: 10 Jun. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR-15575**: desempenho térmico de edificações. Parte 1- edifícios habitacionais de até cinco pavimentos. Rio de Janeiro, 2013. Disponible en: <http://360arquitetura.arq.br/wp-content/uploads/2016/01/NBR_15575-5_2013_Final-Sistemas-de-Cobertura.pdf>. Acceso en: 25 jun. 2015.
- _____. **Projeto de normas de desempenho térmico de edificações 02:135. 07-001** – Parte 1: definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2003.
- BAKER, A.J.M.; BROOKS, R.R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements – a review of their distribution, ecology and phytochemistry. **Biorecovery**, v.1, n.2, p.81-126, 1989.
- BANTING, D. et al. **Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto**. Toronto: Toronto City Planning Division and Ontario Centres of Excellence. Earth and Environmental Technologies (OCE-ETech). 2005. Disponible en: <<http://www.toronto.ca/greenroofs/pdf/executivesummary.pdf>>. Acceso en: 24 Feb. 2016.
- BASS, B.; BASKARAN, B. **Evaluating rooftop and vertical gardens as an adaptation strategy for urban areas**. Ottawa: Institute for Research and Construction; National Research Council, 2003. (NRCC-46737, Project number A020, CCAF report B1046).
- BOGO, A. et al. **Bioclimatologia aplicada ao projeto de edificações visando o conforto térmico**. Santa Catarina: Núcleo de pesquisa em construção, Departamento de Engenharia civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1994. (Relatório interno).

BRASIL. Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Secretaria Nacional de Irrigação, Departamento Nacional de Meteorologia. **Normas climatológicas 1961 - 1990**. Brasília, 1992.

CALLISTER, W. **Materials science and engineering** - an introduction. New York: John Wiley, 2003.

CARLO, J.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. The Use of computer simulation to establish energy efficiency. In: INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8., Eindhoven, 2003. **Proceedings...** Eindhoven: IBPSA, 2003.

CELIS D'AMICO, F. Arquitectura bioclimática, conceptos básicos y panorama actual. In: SEMINARIO DE ARQUITECTURA INTEGRADA EN SU MEDIO AMBIENTE DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, 2000. Madrid. Disponible en:<<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n14/afcel.html>>. Acceso em: 3 fev. 2016.

CLAYTON, P. A.; PRICE, M. J. **The Seven Wonders of the Ancient World**. New York: Routledge, 179p., 1989

ÇENGEL, Y.A. **Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico**. 3.ed. Mexico: McGraw-Hill, 2007. Disponible en:<https://www.ucursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf>. Acceso en: 5 oct. 2015.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS. [Imágenes de satélite]. Disponible en:<www.cptec.inpe.br>. Acceso en: 10 dic. 2016.

CHEN, Y.C.; PEI, L.; SHIAU, Y.C. Application of coastal vegetation to green roofs of residential buildings in Taiwan. **Artificial Life and Robotics**, v.20, n.1, p.86-91, 2015.

COMA, J. et al. New green facades as passive systems for energy saving on buildings. **Energy Procedia**, v.57, p.1851-1859, 2014.

CORRADI, L. **Hydroponic growing system**. US 20090007486, 20 Dec. 2007; 8 Jan. 2009.

CORREA, C.B. **Análisis de la viabilidad y comportamiento energético de la cubierta plana ecológica**. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2001.

COSTA, E.C. **Física aplicada a construção: conforto térmico**. 3.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1974.

COSTA, E.C.C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.

DINSDALE, S.; PEAREN, B.; WILSON, C. **Feasibility study for green roof application on queen's university campus**. Kingston: Queen's Physical Plant Services, 2006. p.58.

DOCHERTY, M.; SZOKOLAY, S.V. **Climate analysis**. Brisbane: Passive and Low Energy Architecture International, University of Queensland Printery, 1999.

DORNELLES, K.A.; RORIZ, M. Efeitos da inércia térmica sobre as temperaturas internas de edificações na cidade de São Carlos, SP. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8./ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO AMBIENTE CONSTRUÍDO,4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: COTEDI, 2005. p.586- 594.

DUNNETT, N.; KINGSBURY, N. Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments. **Urban Ecosyst**, v.11, n.4, p.385-398, Dec. 2008a.

_____. **Planting green roofs and living walls**. Portland: Timber, 2008b.

FERRARI, A.L. **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. 2012. 172p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-23112012-133929/en.php>>. Acesso em: 14 dic. 2014.

FIORETTI, R. et al. Green roof energy and water related performance in the mediterranean climate. **Building and Environment**, v.45, n.8, p.1890-1904, 2010.

FRACCAROLI **vista panorámica realizada con dron de las células experimentales**. 2015. 1 foto, color., 7.72cm x 12.72 cm. (Realizada con Dron sobre el recinto de CRHEA).

FRANCIS, R.; LORIMER, J. Urban reconciliation ecology: the potential of living roofs and walls. **Journal Environmental Management**, v.92, n.6, p.1429-1437, June 2011.

FREITAS, R. O Que é conforto. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8./ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005. p.726-735.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de conforto térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Desempenho térmico das edificações - parte1: definições, símbolos e unidades**. Florianópolis, 1998. Proposta de norma.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2.ed. London: Applied Science, 1976.

GIVONI, B.; VECCHIA, F. Predicting thermal performance of occupied houses. In: CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 18., 2001, Floranopolis. **Anais...** Floroanopolis: PLEA, 2001.

GOATLEY, J.M.; MALDDOX, V.L.; WATKINS, R.M. Growth regulation of Bahiagrass (*Paspalumnotatum* Fluegge) with imazaquin and AC 263, 222. **HortScience**, v.31, n.3, p.396-399, 1996. Disponível em:<<http://hortsci.ashspublications.org/content/31/3/396.short>>. Acesso em: 18 Apr. 2014.

GOODWIN, S.; CATANI, M. The Effect of mass on heating and cooling loads and on insulation requirements of buildings in different climates. **ASHRAE Transactions**, v.85, n.1, p.869-884, 1979.

GRIFFIN, S.M.E. **Ventilación natural efectiva y cuantificable**. Confort térmico en climas cálido-húmedos. Venezuela: Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela, 1999.

GRUJIC, J. **Funcionalidades de la vegetación en el metabolismo de edificio**. 2011. Tesina (Máster) – Universitat Polytécnica de Catalunya, Barcelona, 2011.

HOLM, D. Thermal improvement by means of leaf cover on external walls – a simulation model. **Energy and Buildind**, v.14, n.1, p.19-30, Dec. 1989.

- HUNTER, A.M. et al. Quantifying the thermal performance of green façades: a critical review. **Ecological Engineering**, v.63, p.102-113, 2014.
- KINZIE, P.A. **Thermocouple temperature measurement**. New York: John Wiley, 1973.
- KISSMANN, K.G. **Plantas infestantes e nocivas**. São Paulo: BASF Brasileira, 1997. p.679-684.
- KOHLER, M. Green facades - a review back and some vision. **Urban Ecosystems**, v.11, n.4, p.423-436, Dec. 2008.
- KORC, M.E. **Comisión económica para América Latina y el Caribe**. 2010. (CEPAL – SERIE Seminarios y conferencias, n.9). Disponible en:<<http://www.eclac.org>>. Acceso en: 6 nov. 2013.
- KVISGAARD, B. **Thermal comfort**. Thermal/ INNOVA. Denmark: Air Tech Instruments, 1997. Disponible en:<<http://www.innova.dk/books/>>. Acceso en: 10 nov. 2014.
- LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, O.R.F. **Eficiência energética na arquitetura**. 3.ed. Brasília: MME; Rio de Janeiro: PROCEL; ELETROBRAS, 2005.
- LAMBERTS, R.; GHISI, E. **Desempenho térmico de edificações**. Florianópolis: Universidade Federal De Santa Catarina, 2005. Disciplina ECV 5161.
- LAURENZ, J. et al. Natural envelope: the green element as a boundary limit. In: THE 2005 WORLD SUSTAINABLE BUILDING CONFERENCE, 2005, Tokyo. **Proceedings...** [S.l.:s.n.], 2005.
- LOHR, V.I.; PEARSON MIMS, C.H.; GOODWIN, G.K. Interior plants may improve worker productivity and reduce stress in a windowless environment. **Journal of Environmental Horticulture**, v.14, p.97-100, 1996.
- LORENZI, H.; SOUZA, H.M. **Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas**. Nova Odessa: Plantarum, 2000.
- MANSO, M.; CASTRO-GOMES, J. Green wall systems: a review of their characteristics. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.41, p.863-871, Jan. 2015.
- MARTENS, M.; MICHELSEN, A. Absorption of acoustic energy by plants leaves. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v.69, n.1, p.103-306, 1981.
- MARTINEZ, E.; SCOONES, C.; PALADINI, E. Thunbergia laurifolia lindl (acanthaceae) exotic climber cultivated in argentina. **Multequina**, v.11, p.61-64, 2002. Disponible en:<http://www.cricyt.edu.ar/multequina/indice/pdf/11/11_4.pdf>. Acceso en: 3 Feb. 2014.
- McPHERSON, E.G. Preserving and restoring urban biodiversity: cooling urban heat islands with sustainable landscapes. In: PLATT, R.H.; ROWNTREE, R.A.; MUICK, P.C. (Ed.). **The Ecological city**. Amherst: University of Massachusetts Press, 1994. p.151-172.
- MENTENS, J.; RAES, D.; HERMY, M. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?. **Landscape and Urban Planning**, v.77, n.3, p.217–226, Aug. 2006.
- MINISTRY OF ECONOMY BADEM-WÜRTTEMBERG IN COOPERATION WITH ENVIRONMENTAL PROTECTION DEPARTMENT OF STUTTGART. **Climate booklet for urban development**. Stuttgart, 2008.

MIOTTO, U.; GARCÍA, R. Diseño integrado para viviendas energéticamente eficientes en Chile: enhebrando capacidades. *Hábitat Sustentable*, v.1, n.1, p.2-13, dic. 2011.

MONTEIRO, C.A.F. **A Dinâmica climática e as chuvas do estado de São Paulo**: estudo geográfico sob a forma de atlas. São Paulo: USP/IG, 1967.

MORAIS, C.S. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2004.
 NOLASCO, C.G.; ALBORES, J.J.L.; TORRES, R.P.R. **Climatología y espacio construido**. Chiapas: Universidad Autónoma de Chiapas, Facultad de Arquitectura, 2010.

NIACHOU, A.; PAPAKONSTANTINO, K.; SANTAMOURIS, M., TSANGRASSOULIS, A.; MIHALAKAKOU, G. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings* 33, 719-729, 2001.

OCHOA, J.M. **La Vegetación como instrumento para el control microclimático**. 1999. Tesis (Doctoral) - Universidad Politécnica de Cataluña, Escuela Superior de Arquitectura de Barcelona, Barcelona, 1999.

OKE, T.R. The Urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, v.12, p.471-508, 1988.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima**: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

PAPADAKIS, G.; TSAMIS, P.; KYRITSIS, S. An Experimental investigation of the effect of shading with plants for solar control of buildings. *Energy and Buildings*, v.33, p.831-836, 2001.

PAPST, A.L. **Uso da inércia térmica no clima subtropical**: estudo de caso em Florianópolis – SC. 1999. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PECK, S.W. et al. **Greenbacks from green roofs**: forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for green roof and vertical garden technology diffusion. Canada: Mortgage and Housing, 1999.

PÉREZ G. et al. Green vertical systems for building as passive for energy saving. *Applied Energy*, v.88, n.12, p.4854-4859, Dec. 2011.

PÉREZ, G. et al. Ensayos con arquitectura vegetada: medida experimental de la contribución de las cubiertas y fachadas verdes al ahorro energético en la edificación en España. *Seguridad y Medio Ambiente*, n.118, p.34-45, 2010. Disponible en: <https://www.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/catalogo_imagenes/grupo.cmd?path=1059105>. Acceso en: 10 sept. 2014.

_____. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, v.88, n.12, p.4854-4859, Dec. 2011a.

_____. Behaviour of green facades in mediterranean continental climate. *Energy Conversion and Management*, v.52, n.4, p.1861-1867, 2011b.

PERUSSI, R. **Comportamento térmico de um sistema de cobertura verde**: um experimento utilizando plataformas de teste. 2016. 88p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

PORTILLA, N.J. **Los Jardines verticales en la edificación**. Tesis (Máster) - Escuela Superior de Ingeniería de Edificación, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2013.

RIOS, A.E.G. La Arquitectura y la eficiencia energética. **Facultad de Arquitectura y Urbanismo Boletín Mensual del Laboratorio de Acondicionamiento Ambiental**, v.4, n.26, 2011.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2.ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto, 1986.

RORIZ, M.; CHVATAL, K.M.S.; CAVALCANTI, F.S. Sistemas constructivos de baixa resistência térmica podem proporcionar mais conforto. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 10./ ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2009, Natal. **Anais...** p.700-707. Disponível em: <http://www.fau.usp.br/cursos/graduacao/arq_urbanismo/disciplinas/aut0276/Desempenho_Termico/Roriz_Chvatal_Cavalcanti_2009_Baixa_Resistencia_Termica.pdf>. Acesso em: 29 mayo 2015.

ROWE, D.B. Green roofs as a means of pollution abatement. **Environmental Pollution**, v.159, n.8/9, p.2100–2110, Aug./Sept. 2011.

RUAS, Á.C. **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificados e sua aplicação num software**. 2002. 183p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SANTAMOURIS, M. The Canyon effect. In: SANTAMOURIS, M. (Ed.). **Energy and climate in the urban built environment**. London: Routledge Taylor & Francis, 2001. p.69–96.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOLOUS, D. Advances in thermal confort studies. In: _____. (Ed.). **Passive cooling of building**. London: James & James, 1996. p.34.

SANTOS, D. J. P. **Desempenho térmico de uma cobertura verde num edifício solar passivo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente), Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2012.

SCARAZZATO, P.S. **Investigação sobre critérios para determinação e medição de níveis de conforto térmico**. São Paulo: FAU/USP, 1988.

SCHUMANN, L.; TILLEY, D. Modeled effects of roof vine canopy on indoor building temperatures in July. In: NORTH AMERICAN GREEN ROOF CONFERENCE: greening rooftops for sustainable communities, 6., 2008, Baltimore. **Proceedings...** Toronto: The Cardinal Group, 2008.

SEIXAS, G.T.C. **Climatologia aplicada á arquitetura: investigação experimental sobre a distribuição de temperaturas internas em duas células de teste**. 2015. 126p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2015.

SILVA, N.C. (2011). **Telhado verde: sistema construtivo de maior eficiência e menor impacto ambiental**. Monografia (Especialização em Construção Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

SHEWEKA, S.; MAGDY, N. The Living walls as an approach a healthy environment. **Energy Procedia**, v.6, p.592-599, 2011.

SUAREZ DIAZ, J. **Sostenibilidad y eficiencia energética en la arquitectura-construcción**. Disponível em: <<http://www.revistaambienta.es/WebAmbienta/marm/Dinamicas/secciones/articulos/Jorgesuarez.htm>>. Acesso em: 3 fev. 2016.

SUN, T. et al. Hydrometeorological determinants of green roof performance via a vertically-resolved model for heat and water transport. **Building and Environment**, v.60, p.211-224, Feb. 2013.

SUNAKORN, P.; YIMPRAYOON, C. Thermal performance of biofacade with natural ventilation in the tropical climate. **Procedia Engineering**, v.21, p.34-41, 2011.

TAHA, H. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. **Energy and Buildings**, v.25, n.2, p.99-103, 1997.

TEEMUSK, A.; MANDER, Ü. Greenroof potential to reduce temperature fluctuations of a roof membrane: a case study from Estonia. **Building and Environment**, v.44, n.3, p.643-650, Mar. 2009.

VAN RENTERGHEM, T.; BOTTELDOOREN, D. Reducing the acoustical façade load from road traffic with green roofs. **Building and Environment**, v.44, n.5, p.1081-1087, May 2009.

VECCHIA, F. **Clima e ambiente construído: a abordagem dinâmica aplicada a conforto humano**. 1997. 336p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

_____. **Comportamento térmico de sistema de cobertura**. São Paulo: Eternit, 2003.

VECCHIA, F. **Climatologia aplicada ao ambiente construído: análise climática, avaliação e previsão do comportamento térmico de edificações ocupadas**. 2005. 316p. Tese (Livre-Docência) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.

VEGARA, A. Planificación urbanística y sus implantaciones en el mundo en globalización. Lección inaugural del curso 2008-2009 de la UOC. **Revista sobre la Sociedad del Conocimiento**. Disponible en: <http://www.flacsoandes.edu.ec/sites/default/files/agora/files/1227287504.vegara_2.pdf>. Acceso en: 10 jul. 2015.

VILLA, F. Construcciones verdes. **Alarife: revista de arquitectura**, n.17, p.42-54, 2009.

WILMERS, F. Effects of vegetation on urban climate and buildings. **Energy and Buildings**, v.15, n.3/4, p.507-514, 1990.

WOLVERTON, B.C.; DOUGLAS, W.; BOUNDS, K. **A Study of interior landscape plants for indoor air pollution abatement**. Washington: Indoor air Quality Committee, 1989.

WONG N.H., KWANG TAN, A.L., YOK TAN, P., CHEN Y., SEKAR K., CHIANG K., WONG C.N., CHAN D., Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and Environmental**, v.45, n.3, p.663-672. 2010.

WONG, N.H. et al. Energy simulation of vertical greenery systems. **Energy and Buildings**, v.41, n.12, p.1401-1408, Dec. 2009.

_____. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. **Building and Environment**, v.45, n.3, p.663-672, Mar. 2010.

YANNAS, S.; MALDONADO, E. (Ed.). **PASCOOL handbook - designing for summer comfort**. London: Architectural Association Graduate School, 1995. Cap. 4.

ZINCO. Disponible en: <<http://www.zinco-greenroof.com/EN/references/index.php>>. Acceso en: 24 abr. 2016.

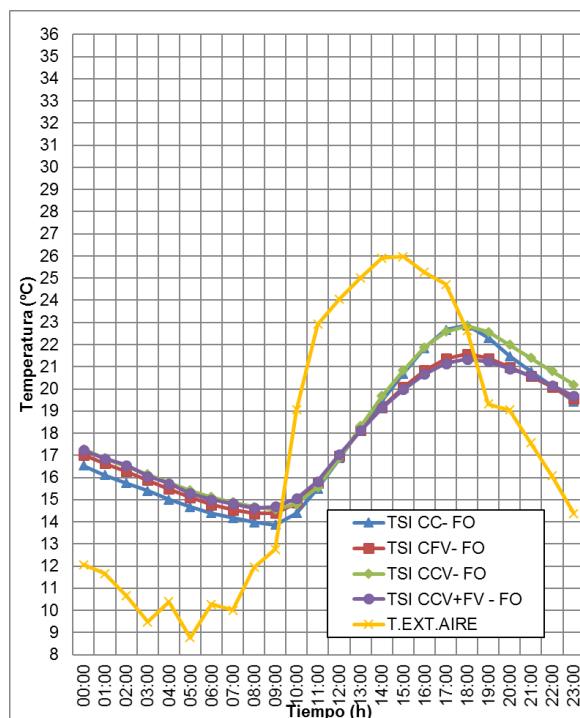
ANEXO A: COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE LAS FACHADAS OESTE

- Día crítico experimental de frío.

La Figura 32, muestra el gráfico de las temperaturas superficiales internas de las fachadas Oeste junto con la temperatura externa del aire.

Las fachadas Oeste presentan el mismo comportamiento que las fachadas Norte analizadas anteriormente. En las primeras horas del día, cuando se registran las temperaturas más bajas del día, la temperatura superficial más baja es registrada en la célula de ensayo sin vegetación como se muestra en la siguiente figura.

Figura 1: Gráfico de Temperatura superficial interna de las fachadas Oeste vs Temperatura externa del aire.



Fuente: Autora (2015).

El resto de las células de ensayo presentan casi la misma temperatura, hasta el momento en que la temperatura externa empieza a subir. La temperatura externa más elevada (26°C) se produce a las 14h, por otra parte, las dos células de ensayo sin vegetación en sus fachadas Oeste (Control y célula con cubierta ajardinada), presentan las temperaturas más altas (22.8°C) a las 18h, es decir, que la diferencia es de casi 3°C respecto de la temperatura externa y presenta un atraso de 4h.

Por el contrario, las temperaturas menores las encontramos en las dos células con fachadas vegetales (Célula con fachadas verdes y célula con fachadas verdes y cobertura verde) con 21,5°C a las 18h, es decir, con una diferencia de casi 5°C con la temperatura externa y un atraso de 4h.

En la Tabla 5, se describen las amplitudes térmicas registradas en cada una de las células de ensayo. En ella podemos ver que las mayores amplitudes se manifiestan en la célula Control (9°C) (sin vegetación) y en la que posee cubierta verde (8.2°C). Por el contrario, las menores se observan en la célula construida con fachadas verdes y la célula con fachadas y cubierta verde (Aprox. 7°C).

Tabla 13: Cuadro resumen de amplitudes térmicas en Fachadas Oeste.

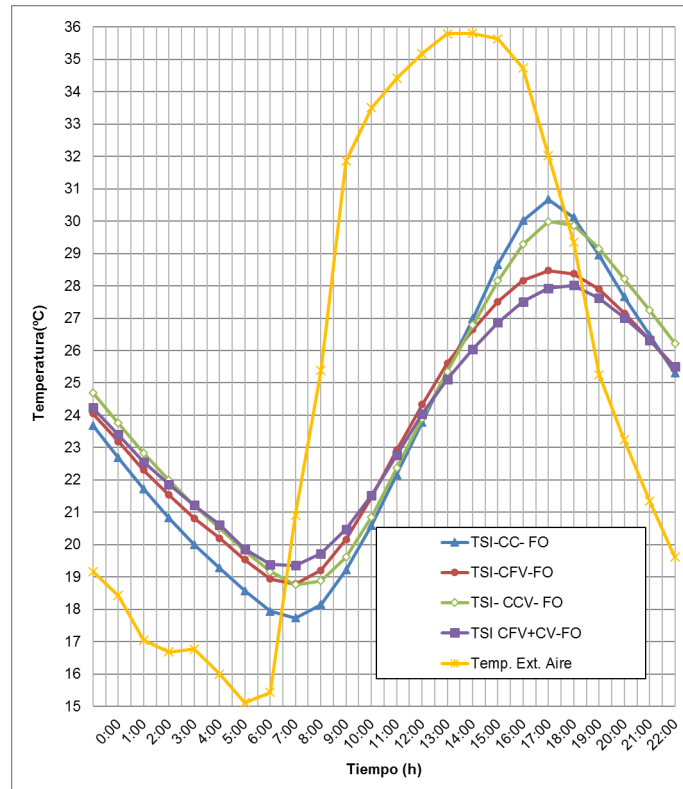
FACHADAS OESTE	TSI (°C) CC	TSI (°C) CFV	TSI (°C) CCV	TSI (°C) CFV+CV
T°C Mín.	13,9	14,4	14,6	14,8
T°C Máx.	22,9	21,6	22,8	22,1
$\Delta T^{\circ}C$.	9	7,2	8,2	7,3

Fuente: Autora (2015).

- **Día crítico experimental de calor.**

En la figura 33 se muestra el gráfico de las temperaturas superficiales internas de las fachadas en el día crítico experimental de calor. En él, se observa que, en las primeras horas del día, aunque el comportamiento de todas las células es bastante aproximado, apreciamos una significativa diferencia entre la célula de ensayo construida con ladrillo y teja cerámicos, en la que se registra una temperatura mínima de 17,7°C a las 8h, o sea, una temperatura 2,5°C más elevada que la temperatura externa (15°C) cuando se registran las temperaturas más bajas del día. Además, en el periodo matutino, la célula con fachadas verdes y cubiertas verdes presenta su temperatura mínima de 19.4°C a las 8h, es decir, 2°C más que la célula control y 4°C más que la temperatura externa.

Figura 2: Temperatura superficial interna de las fachadas Oeste de cada célula de ensayo – Temperatura externa del aire.



Fuente: Autora (2015).

En el periodo de la tarde, y después de alcanzar la temperatura externa máxima, (35,8°C a las 15h) el comportamiento se invierte para registrar las temperaturas más altas en la célula de ensayo construida sin vegetación, 31°C a las 18h, y la más baja en la célula con fachadas verdes y cubierta verde, 28°C a las 19h. O sea, una diferencia de temperatura de 3°C y un retraso térmico de una hora.

A esta célula, le sigue la temperatura superficial registrada en la célula con fachadas verdes, que registró una temperatura de 28°C a las 18h, es decir, una diferencia con la célula control de 3°C. En este caso, no presenta retraso térmico respecto de la célula control.

Por último, la célula con cubierta verde, presenta la temperatura más alta después de la célula control, con un registro de 30°C a las 18 horas, comportamiento similar a la célula de ladrillo y teja cerámica ya que, en este caso, sus fachadas están desprovistas de vegetación.

En la siguiente tabla (Tabla 14) se muestran las amplitudes térmicas registradas para ese día en cada una de las células estudiadas, observándose la menor en la célula con cobertura y fachadas verdes y la mayor en la célula construida sin vegetación.

Tabla 14: Resumen de las amplitudes térmicas en las temperaturas registradas en las fachadas Oeste.

AMPLITUD TÉRMICA (°C)	CC	CFV	CCV	CFV+CV
FACHADAS OESTE	13	9,7	11,2	8,6

Fuente: Autora (2015).

ANEXO B: ANEXO FOTOGRÁFICO. SECUENCIA FOTOGRÁFICA DEL DESARROLLO DE LOS EXPERIMENTOS

1.1. Desarrollo de los experimentos

- Construcción de las cubiertas verdes
 - Estado inicial de las células de ensayo
 - Retirada del antiguo tejado
 - Inicio de las obras
 - Construcción de la losa
 - Impermeabilización
 - Instalación de manta geotextil
 - Relleno del tejado verde y vegetación
 - Acabado
- Construcción de las fachadas verdes
 - Acondicionamiento del terreno para plantación de *Tumbergias*
 - Preparación del terreno para plantación de *Tumbergias*
 - Estado inicial de las plantas
 - Vista frontal de fachada Norte estado inicial
 - Estado de las plantas después de un ataque de hormiga cortadora
 - Detalle de hoja afectada
 - Detalle de planta afectada
 - Detalle de hormiguero
 - Estado de las fachadas en enero
 - Estado de las fachadas en febrero
 - Estado de las fachadas en marzo
 - Estado de las fachadas en junio
 - Detalle de flores
 - Vista general del recinto y de las células de ensayo.
 - Detalle de fachadas acabadas y completamente cubiertas
- Instalación de termopares y equipos de medida automáticos
 - División e instalación subterránea de termopares para cada célula de ensayo
 - Conexión de termopares con DataLogger
 - Instalación de termopar en superficies
 -
- Instalación del sistema de riego.
 - Instalación del sistema hidráulico
 - Conexión de la bomba la instalación

- Instalación de válvulas solenoides
- Instalación de programador
- Instalación de sensor de lluvia

- **Construcción de la cubierta verde.**

Estado inicial de las células de ensayo



Retirada del antiguo tejado





Construcción de la losa



Aplicación del impermeabilizante



Colocación de la manta geotextil



Detalle manta

Detalle instalación manta geo geotextil



Fuente: Perussi,20016

Relleno de tierra y vegetación



Estado final. Acabado de cubierta verde





Cubierta verde finalizada

- **Construcción de las fachadas verdes.**





*Estado inicial de las plantas.
noviembre*



Estado inicial de las plantas



Vista frontal de fachada Norte. Estado inicial

- Estado de las plantas después de un ataque de hormiga cortadora. Semana 1.





Estado de las plantas en enero



Estado de las plantas en febrero



Estado de las plantas en febrero





Detalle de flores de Thumbergia grandiflora



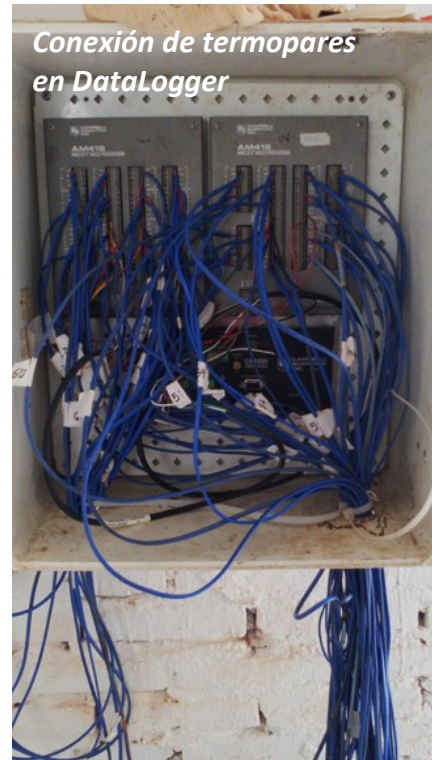
Detalle de flores de Thumbergia grandiflora



Vista de las fachada Norte y cubiertas verdes



- **Instalación de equipos de medición y termopares.**





- **Instalación del sistema de riego**



