

Caracterización experimental y modelo
predictivo del comportamiento térmico de una
fachada vegetal

Francesca Olivieri

27 de septiembre de 2013

Resumen

La aplicación de las estrategias que promuevan la eficiencia energética y la sostenibilidad en el sector de la construcción es una tarea de fundamental importancia que estamos llamados a llevar a cabo como ciudadanos, profesionales e investigadores.

Esta tesis doctoral se enmarca dentro de los trabajos de investigación llevados a cabo en los últimos años que, en la línea más general de analizar sistemas a la vez energéticamente eficientes y beneficiosos para la mejora del confort de los usuarios, se han centrado en la caracterización de los efectos sobre edificios y medioambiente derivados de la aplicación de fachadas vegetales en el ámbito arquitectónico.

La investigación parte del análisis del papel que las envolventes vegetales han tenido en relación a la arquitectura a lo largo de la Historia, para luego examinar su papel actual que, más allá de su reconocido valor estético, cada vez más cobra una función arquitectónica propia. Prueba de ello es la creciente integración de las superficies vegetales experimentada en los últimos años tanto en entornos arquitectónicos como urbanos; reflejo, a su vez, del desarrollo gradual de nuevas investigaciones sobre fachadas vegetales y de la difusión de diferentes sistemas en el mercado.

Tras realizar un análisis detallado de los resultados obtenidos hasta el momento en el campo de la investigación y una vez detectadas sus carencias, se procede a plantear el objetivo general de esta tesis: analizar el comportamiento térmico de una solución constructiva que incorpore un elemento vegetal, a través de la monitorización de un prototipo experimental a escala real, así como, generar una herramienta flexible que permita predecir el comportamiento térmico de determinados tipos de fachadas vegetales, posibilitando su utilización en contextos diferentes al de estudio.

Con el fin de elegir el sistema de fachada vegetal más adecuado para el estudio experimental, se realizan un análisis y una catalogación de los sistemas de fachadas vegetales existentes en el mercado. Para cada sistema, se destacan las principales características, las ventajas y los inconvenientes. Para evaluar la aplicabilidad del sistema a gran escala, se fijan unos criterios de selección basados en el grado de industrialización, la eficiencia energética y la sostenibilidad.

Finalmente, se elige el sistema más adecuado para el estudio experimental: sistema con elementos modulares industrializados prevegetados compuestos por cajas contenedoras de sustrato y vegetación perenne. Como siguiente paso, se procede al diseño del experimento y se da comienzo a la fase experimental que comprende más de tres años, distinguiéndose dos etapas. En ambas, la experimentación se basa en la comparación de dos cerramientos idénticos cuya única diferencia está constituida por una capa de vegetación existente en uno de ellos. En una primera etapa, a través de un tratamiento estadístico de los datos, se analiza el comportamiento energético de un cerramiento sin aislante con el objetivo de caracterizar térmicamente el ele-

mento vegetal (sustrato más vegetación), eliminando las variables relativas a la composición del cerramiento. En una segunda etapa, se monitoriza un cerramiento con aislante con el fin de verificar la efectividad energética del sistema vegetal en cerramientos aislados.

Tras corroborar la eficacia energética de dicho sistema, incluso en cerramientos aislados, se concluye el trabajo con el desarrollo de un modelo de predicción del comportamiento térmico de determinados tipos de fachadas vegetales. El modelo, de rápida y sencilla utilización, permite estimar el comportamiento térmico de una fachada vegetal en función de la temperatura exterior, la humedad relativa del aire en el exterior y la irradiancia global. Dicho modelo, desarrollado a partir de los datos tomados durante la monitorización, ha sido validado experimentalmente mostrando un elevado grado de fiabilidad.

Abstract

Mettere in atto strategie di promozione dell'efficienza energetica e della sostenibilità nel settore delle costruzioni è un compito di fondamentale importanza che siamo chiamati a svolgere, come cittadini, professionisti e ricercatori.

Questa tesi si colloca all'interno delle ricerche che, nella linea generale di sviluppo di sistemi che siano sia efficienti dal punto di vista energetico sia vantaggiosi dal punto di vista del miglioramento del comfort degli utenti, negli ultimi anni si sono occupate di indagare gli effetti sulle costruzioni e sull'ambiente derivati dall'applicazione di facciate verdi negli edifici.

La ricerca si sviluppa partendo dall'analisi del ruolo che coperture e facciate verdi hanno avuto nel corso della storia dell'Architettura per poi giungere ad esaminare il loro ruolo nell'attualità: oltre a un riconosciuto valore estetico in maniera crescente queste tecnologie sono chiamate a svolgere una funzione architettonica propria. Ciò è dimostrato dalla crescente integrazione di superfici verdi sia a livello architettonico sia a livello urbano registrata negli ultimi anni, che è a sua volta conseguenza del graduale sviluppo di nuove ricerche sulle facciate verdi e della diffusione nel mercato di differenti sistemi.

Dopo aver realizzato un'analisi dettagliata dei risultati ottenuti finora

nel campo della ricerca e una volta individuate le loro carenze, si procede a fissare l'obiettivo generale di questa tesi: analizzare il comportamento termico di una soluzione costruttiva che incorpora un elemento di vegetale attraverso il monitoraggio di un prototipo sperimentale in scala reale, così come generare uno strumento flessibile che consenta di prevedere il comportamento termico di alcuni tipi di facciate verdi, possibilitando il suo uso in contesti diversi da quello studiato.

Al fine di scegliere il sistema di facciata verde più adatto allo studio sperimentale, si effettua un'analisi e una catalogazione dei sistemi attualmente esistenti nel mercato. Per ogni sistema si mettono in evidenza le sue principali caratteristiche, i vantaggi e gli svantaggi, e si fissano criteri di selezione basati sul livello di industrializzazione del sistema, sulla sua efficienza energetica e sulla sostenibilità, con il fine ultimo di promuovere l'applicabilità del sistema a larga scala.

Infine, si sceglie il sistema più adeguato per lo studio sperimentale: il sistema industrializzato modulare composto da pannelli prevegetati con substrato e vegetazione perenne. Come passo successivo, si procede allo sviluppo dell'esperimento e si dà inizio alla sperimentazione, composta da due fasi, che si sviluppa durante più di tre anni. In entrambe le fasi, la sperimentazione si basa sul confronto di due serramenti identici la cui unica differenza è costituita dallo strato di vegetazione presente in uno di essi.

Nella prima fase, attraverso un trattamento statistico dei dati, si analizza il comportamento energetico di un involucro non isolato per caratterizzare termicamente l'elemento vegetale (vegetazione più substrato), eliminando le variabili relative alla composizione del serramento.

Nella seconda fase, si studia un involucro isolato con il fine di verificare l'efficacia energetica del sistema verde in serramenti isolati.

Dopo aver dimostrato che il sistema è efficiente anche quando applicato in involucri isolati, il lavoro si conclude con lo sviluppo di un modello predittivo del comportamento termico di alcuni tipi di facciate verdi. Il modello, veloce e di semplice utilizzo, permette la stima del comportamento termico di una facciata verde conoscendo la temperatura esterna, l'umidità relativa esterna e l'irradianza globale. Questo modello, sviluppato a partire da dati di monitoraggio, è stato validato sperimentalmente mostrando un elevato grado di precisione.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objeto e interés del tema	2
1.2. Justificación de la investigación	4
1.3. Hipótesis de partida	7
1.4. Objetivos	7
2. Envolventes vegetales en la arquitectura	9
2.1. Desde la antigüedad hasta 1865	13
2.2. Desde 1865 hasta la segunda guerra mundial	18
2.3. Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad	20
2.4. Conclusiones sobre la presencia de envolventes vegetales en la arquitectura	43
3. Estado de la cuestión	45
3.1. Criterios de búsqueda	48
3.2. Selección de los estudios más significativos para la investigación	51

3.3. Estudio sobre los efectos provocados por las envolventes vegetales en edificios y entornos	124
3.3.1. Reducción de la demanda energética para calefacción y refrigeración	125
3.3.2. Reducción del efecto isla de calor	136
3.3.3. Regulación del ciclo hidrológico	139
3.3.4. Filtración de contaminantes presentes en el aire	141
3.3.5. Reducción del ruido	142
3.4. Conclusiones sobre el estado documental de los trabajos científicos previos	143
4. Clasificación de las fachadas vegetales existentes	151
4.1. Clasificación constructiva	152
4.1.1. Fachadas vegetales continuas	154
4.1.2. Fachadas vegetales modulares	157
4.1.3. Fachadas vegetales puntuales	157
4.2. Especies vegetales	158
4.3. Conclusiones sobre la caracterización constructiva de las fachadas vegetales	162
5. Criterios de selección y diseño del modelo a desarrollar	165
5.1. Criterios de selección	167
5.1.1. Industrialización	168
5.1.2. Montaje	169
5.1.3. Mantenimiento	170
5.1.4. Efectividad energética	172

5.1.5. Peso	173
5.1.6. Riego	174
5.1.7. Coste económico	176
5.1.8. Reutilizabilidad	177
5.2. Diseño de la fachada	178
5.2.1. Vegetación	179
5.2.2. Sustrato	181
5.2.3. Caja y fieltro	181
5.2.4. Estructura de anclaje	182
5.2.5. Sistema de riego	182
5.3. Determinación de la resistencia térmica del sustrato mediante ensayos de laboratorio	183
5.4. Conclusiones sobre la selección del sistema	186
6. Prototipo experimental	189
6.1. Localización de las fachadas	190
6.2. Descripción del prototipo	191
6.3. Descripción de los sensores y del sistema de adquisición de datos	193
6.4. Fases de monitorización	195
7. Datos y análisis de resultados de la primera fase de monito- rización	199
7.1. Descripción de clima del lugar	200
7.1.1. Invierno	205
7.1.2. Verano	206
7.1.3. Primavera y otoño	207

7.2. Datos	209
7.3. Temperatura superficial exterior	210
7.4. Temperatura superficial interior	212
7.5. Temperatura interior	215
7.6. Conclusiones	217
8. Datos y análisis de resultados de la segunda fase de monito- rización	219
8.1. Condiciones climáticas locales	221
8.2. Temperaturas del aire y superficiales	222
8.2.1. Temperaturas mínimas y máximas	223
8.2.2. Reducción de las temperaturas debida a la capa vegetal	230
8.2.3. Desfase de la onda térmica en cada uno de los módulos	232
8.2.4. Gradiente térmico de los dos cerramientos	236
8.3. Flujo de calor	239
8.4. Conclusiones	242
9. Desarrollo y validación de un modelo de predicción	245
9.1. Análisis de sensibilidad del Modelo Ecoroof	246
9.2. Resistencia térmica de sustrato y vegetación	250
9.3. Ajuste de un modelo simplificado para cubiertas	254
9.3.1. Modelo del flujo térmico	254
9.3.2. Modelo de la resistencia térmica del sustrato	263
9.4. Validación experimental del modelo para cubiertas	266
9.4.1. Descripción del edificio experimental	266

9.4.2. Descripción de la cubierta ecológica y de los equipo de de toma de datos	268
9.4.3. Validación del modelo simplificado para cubiertas . . .	271
9.5. Aplicación de la metodología a otros lugares	273
9.6. Ajuste de un modelo de regresión lineal para fachadas	277
9.6.1. Modelo predictivo	282
9.6.2. Análisis de resultados	286
9.7. Validación experimental del modelo para fachadas	288
10. Conclusiones	295
10.1. Conclusiones generales	296
10.2. Sobre la caracterización	296
10.3. Sobre el modelo predictivo	299
10.4. Trabajos futuros	301
10.4.1. Adaptabilidad del modelo a otros contextos	301
10.4.2. Monitorización de edificios reales	303
10.4.3. Coste económico del sistema	304
10.4.4. Condicionantes arquitectónicos-urbanísticos	304
10.5. Difusión de resultados	305
10.5.1. Artículos	305
10.5.2. Patente	306
10.5.3. Actas en congresos internacionales	306
10.5.4. Actas en congresos nacionales	308
11. Conclusioni	309
11.1. Conclusioni generali	310

11.2. Conclusioni sulla caratterizzazione	310
11.3. Linee di ricerca aperte	315
11.3.1. Adattabilità del modello ad altri contesti	315
11.3.2. Monitoraggio di edifici reali	317
11.3.3. Costo economico del sistema	317
11.3.4. Condizionanti architettonico-urbani	318
11.4. Diffusione dei risultati	319
11.4.1. Articoli	319
11.4.2. Brevetto	320
11.4.3. Atti di congressi internazionali	320
11.4.4. Atti di congressi nazionali	322

Bibliografia	323
---------------------	------------

Índice de figuras

3.1. The finite differences model of physical system.	61
3.2. Comparison of the energetic exchanges of the dry or wet green roof with a traditional roof, starting from 100 incident solar irradiation units—summer session.	64
3.3. Comparison of the energetic exchanges of the green roof with an traditional roof, starting from 100 incident solar irradiation units—winter session.	65
3.4. The energy balance for a green roof, including latent heat flux (L), sensible heat flux (H), shortwave radiation (Is) and inco- ming long-wave radiation (Iir). Conduction into the soil and the complex exchange of long-wave (LW) radiation within the canopy are also shown.	69
3.5. Energy exchange between an extensive green roof and its en- vironment.	74
3.6. Comparison of three estimated U-values for 10 cm deep subs- trates with the same levels of moisture content with the U- values of a conventional and an advanced insulated roof. . . .	87

3.7. Characteristic sections of (a) a bare and (b) a plant-covered wall surface defining the position of the sensors.	90
3.8. Scenario 1 (left), 2 (center) and 3 (right) of TAS simulations. .	92
3.9. Cooling effect on the exterior surface of a plant-covered wall DTse vs. type of wall configuration and orientation.	101
6.1. Fachada sud del edificio de oficinas de la empresa Intemper donde se han incorporado los prototipos experimentales. . . .	191
6.2. Esquema en planta del prototipo experimental.	192
6.3. Esquema en sección de los módulos experimentales y posición de los sensores de temperatura durante la primera fase de monitorización.	194
6.4. Esquema en sección de los módulos experimentales y posición de los sensores durante la segunda fase de monitorización. . . .	197
7.1. Evolución de la temperatura máxima (a) y mínima (b) diaria.	203
7.2. Diagrama de cajas múltiple para la evolución horaria de la irradiancia global sobre superficie horizontal (a), la temperatura (b) y la humedad relativa (c) exteriores en invierno. . . .	205
7.3. Diagrama de cajas múltiple para la evolución horaria de la irradiancia global sobre superficie horizontal (a), la temperatura (b) y la humedad relativa (c) exteriores en verano. . . .	206
7.4. Diagrama de cajas múltiple para la evolución horaria de la irradiancia global sobre superficie horizontal (a), la temperatura (b) y la humedad relativa (c) exteriores en verano. . . .	208

7.5. Evolución horaria de la diferencia de temperatura en la superficie exterior del panel en cuatro meses de referencia.	212
7.6. Evolución horaria de la diferencia de temperatura en la superficie interior del panel en cuatro meses de referencia.	213
7.7. Evolución horaria de la diferencia de temperatura en la superficie interior del panel en cuatro meses de referencia.	216
8.1. Temperaturas mínimas registradas en el módulo sin vegetación.	223
8.2. Temperaturas mínimas registradas en el módulo con vegetación.	224
8.3. Diferencias entre la temperatura mínima del aire y las temperaturas superficiales mínimas registradas en el módulo sin vegetación (a) y en el módulo con vegetación (b).	225
8.4. Temperaturas máximas registradas en el módulo sin vegetación.	226
8.5. Diferencias entre la temperatura máxima del aire y las temperaturas superficiales máximas registradas en el módulo sin vegetación (a) y en el módulo con vegetación (b).	227
8.6. Temperaturas máximas registradas en el módulo con vegetación.	228
8.7. Reducción de los picos diarios de temperatura en la superficie exterior del cerramiento debido al efecto de la vegetación. . . .	230
8.8. Reducción de los picos diarios de temperatura en la superficie interior del cerramiento debido al efecto de la vegetación. . . .	231
8.9. Valores de irradiancia y temperatura registrados desde el 12 hasta el 15 de julio (a) y desde el 28 hasta el 31 de agosto (b) en los dos módulos.	233

8.10. Radiación, temperatura del aire y humedad relativa registradas en diferentes momentos de los días 30 y 31 de agosto de 2012; temperaturas registradas en diferentes puntos del módulo sin vegetación (línea azul) y del módulo con vegetación (línea roja).	237
8.11. Radiación sobre superficie vertical orientada a sur y flujos térmicos registrados en la cara interior de los dos módulos. . .	239
8.12. Temperatura superficial del cerramiento al interior del módulo (Tsi), temperatura superficial del cerramiento entre el aislante y el panel (Tsb) y flujo térmico registrados en los dos módulos durante tres días tipo.	240
9.1. Método utilizado en las simulaciones: se halla la ganancia térmica de la cubierta para un valor máximo y mínimo de cada variable, dejando las otras variables por defecto. Estos valores se comparan después con el valor obtenido tras emplear todas las variables por defecto.	248
9.2. Resultados del análisis de sensibilidad empleando el modelo Eco roof para estudiar la dependencia de la ganancia térmica sobre las variables características del modelo para la zona climática de Ancona.	249
9.3. Variación de la ganancia térmica con variaciones en “msr” (resistencia estomática mínima). Sólo se observan variaciones en la ganancia térmica para $0,5 \leq msr \leq 0,75s/m$	250

-
- 9.4. Resistencia térmica equivalente de la vegetación con en función del “lai” (índice de área foliar) para los diferentes valores de “hp” (altura de las plantas). 254
- 9.5. 10a: diferencia entre el promedio de las temperaturas superficiales exteriores y el promedio de las temperaturas superficiales en la superficie interior de la cubierta como función de “lai” (índice de área foliar) para diferentes valores de “hp” (altura de las plantas). 10b: resistencia térmica del sustrato con en función del “lai” (índice de área foliar) para diferentes valores de “hp” (altura de las plantas) 255
- 9.6. Ganancia térmica a través dde la cubierta vegetal en función de “lai” (área de índice foliar) para diferentes valores de “hp” (altura de las plantas) 257
- 9.7. Valores promedio de las diferencias entre el valor de la ganancia térmica a través de la cubierta verde para $hp = 0.1$ m y valores para $hp \neq 0.1$ m con $0.29 \leq lai \leq 1.12$ 258
- 9.8. Ganancia térmica a través de la cubierta ecológica en función de “lai” (área de índice foliar) para diferentes valores de “ λ ” (conductividad térmica del sustrato) 261
- 9.9. Cubierta ecológica instalada en un edificio experimental a escala real. 269
- 9.10. Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la mañana. 289
- 9.11. Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos del mediodía. 291

9.12. Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la tarde.	292
9.13. Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la pre media noche.	293
9.14. Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la post media noche.	294

Índice de cuadros

3.1. Flujos de energía diarios y balance energético de la cubierta vegetal.	78
3.2. Comparación entre los valores de transmitancia térmica calculados con TRNSYS y obtenidos con el método de PASLINK.	88
5.1. Principales características de los materiales que componen el panel.	187
7.1. Condiciones climáticas locales durante el período de monitorización. El número de horas es expresado en porcentaje respecto al entero período.	202
7.2. Frecuencias relativas en porcentaje de la combinación de temperatura y humedad relativa en los tres años estudiados.	209
7.3. Valor medio e desviación estándar (entre paréntesis) de las diferencias de temperaturas registradas por los sensores colocados en la misma posición en ambos módulos, para los casos más frecuentes de la combinación de temperatura y humedad relativa exteriores.	210

8.1. Condiciones climáticas locales durante el período de monitorización. El número de días está expresado en porcentaje respecto al número total de días del período de monitorización.	222
8.2. Temperaturas medias del aire exterior e interior.	232
8.3. Picos de irradiancia sobre superficie vertical orientada a sur y temperaturas superficiales máximas en las superficies exteriores (Tse, max) e interiores (Tsi, max) de los dos módulos registrados cada día. El primer dígito indica la hora y el segundo (entre paréntesis) el valor.	234
8.4. Picos de irradiancia sobre superficie vertical orientada a sur y temperaturas superficiales máximas en las superficies exteriores (Tse, max) e interiores (Tsi, max) de los dos módulos registrados cada día. El primer dígito indica la hora y el segundo (entre paréntesis) el valor.	235
8.5. Energía correspondiente a los flujos entrantes y salientes de los módulos a través del cerramiento con vegetación y del cerramiento sin vegetación.	242
9.1. Parametros estimados y coeficientes de determinación para cada uno de los cuatro sensores y los cinco periodos horarios analizados.	280
9.2. Coeficientes calculados para la estimación del valor esperado promedio.	284
9.3. Error cuadrático medio de los modelos estimados.	288

Capítulo 1

Introducción

***Introduzione** In questo capitolo, dopo una prima introduzione relativa all'interesse che oggiogiorno suscita il fenomeno del verde verticale, si analizzano le motivazioni che sono alla base della presente tesi di dottorato. Le principali ragioni per le quali sembra opportuno fare ricerca in questo campo sono le seguenti:*

- *l'utilizzo di facciate verdi rappresenta un'alternativa promettente dal punto di vista dell'efficienza energetica, sia per la grande presenza nelle città di superfici verticali, sia per gli incoraggianti risultati ottenuti dalle ricerche sviluppate fino a questo momento;*
- *i sistemi di facciata sono ancora in fase di sviluppo e si prevede che nei prossimi anni si lavori sia sull'ottimizzazione degli esistenti sia sullo sviluppo di nuovi;*
- *il campo di studio è completamente aperto perché la maggior parte dei*

monitoraggi e delle simulazioni sono state svolte solo recentemente;

- *le nuove ricerche dovranno basarsi sui risultati raggiunti fino a questo momento e concentrarsi sullo sviluppo di nuovi modelli matematici agevolandone l'applicazione in diversi ambiti.*

Le ipotesi della ricerca sono principalmente due, da un lato si vuol dimostrare che l'uso di facciate verdi è energeticamente favorevole sia in estate che in inverno, anche considerando involucri isolati. Dall'altro lato si vuol verificare che è possibile generare un modello di predizione del comportamento termico delle facciate verdi, nonostante lo studio risulti complesso trattandosi di elementi biologici.

En este capítulo se introducen los puntos de partida de la presente tesis doctoral. Tras exponer el objeto y el interés del tema, se pasa a analizar las razones por las cuales se procedió a la investigación para concluir con las hipótesis de partida y los objetivos.

1.1. Objeto e interés del tema

Esta tesis doctoral se basa en la necesidad y responsabilidad que tenemos como investigadores de buscar alternativas de proyecto en el ámbito de la edificación que conlleven un menor impacto medioambiental, reduciendo la demanda energética y mejorando el bienestar de los usuarios.

En este marco, la incorporación de espacios y elementos con vegetación en el diseño arquitectónico y urbano constituye una de las estrategias bioclimáticas más antiguas y, a su vez, más interesantes, ya que materializa la interrelación entre el edificio y el ecosistema circundante. De hecho, las envolventes vegetales siempre han estado presentes en la arquitectura, pero su papel en relación a los edificios ha ido evolucionando a lo largo de la Historia. Actualmente, la integración de sistemas vegetales en arquitectura puede ser empleada como instrumento para incrementar las áreas verdes en las ciudades, posibilitando el diseño de envolventes que promuevan el ahorro energético y respondan a condiciones medioambientales específicas.

En los últimos años, como consecuencia del creciente interés en ahorro energético y sostenibilidad ambiental en los edificios, se han realizado numerosos estudios sobre el potencial de las envolventes vegetales en este campo. En la mayoría de los casos, las investigaciones se centran en el análisis del comportamiento energético de este tipo de envolventes, así como, los efectos derivados de su aplicación en edificios y medioambiente, desde puntos de vista muy diversos: térmico, reducción del efecto isla de calor urbano, regulación del ciclo hidrológico, calidad del aire y confort acústico. En otros campos, los estudios se enfocan hacia los efectos sobre la biodiversidad, así como, los beneficios sociales y psicológicos ligados a la presencia de superficies vegetales en ciudades.

Desde el punto de vista energético, aspecto asociado a las superficies vegetales y objeto de esta tesis, la gran ventaja del uso de vegetación en localidades con elevada irradiación está vinculada a la capacidad de las plantas de absorber la mayor parte de la radiación solar recibida y a la consiguiente

utilización de la misma para sus funciones biológicas. Esto permite que, al contrario de lo que ocurre con otras superficies expuestas a radiación solar, la vegetación no se sobrecaliente y su temperatura se mantenga parecida a la temperatura del aire. Esta simple ventaja permite que la vegetación se transforme en un material muy interesante desde el punto de vista de su comportamiento energético, siendo necesaria la investigación de los efectos derivados de su integración en los edificios.

1.2. Justificación de la investigación

Dentro del marco general de estudio de las posibilidades de incorporación de elementos vegetales en edificios y entornos, la integración de vegetación en las fachadas es una disciplina relativamente emergente, debido principalmente a dos razones:

- los sistemas de fachada aún se encuentran en fase de desarrollo tecnológico y se espera que en los próximos años se trabaje en la optimización de los existentes y en el desarrollo de nuevos;
- el campo de estudio se presenta totalmente abierto, dado que la mayoría de las investigaciones se han llevado cabo sólo durante los últimos años.

Generalmente, estas investigaciones tienden a basar sus conclusiones en datos experimentales de monitorizaciones y ensayos o bien, en resultados de simulaciones. La complejidad y existencia de gran variedad tanto de programas de simulación como de metodologías de ensayo y monitorización se debe precisamente a la dificultad de no poder tratar los principales componentes

de las envolventes vegetales (vegetación, sustrato y agua) como cualquier otro material. Por un lado, la vegetación es un elemento vivo que interactúa con el ambiente y el edificio de muy diferentes modos, dependiendo de las condiciones climáticas e hidrológicas, tipo de planta empleado, etc. Por otro lado, el sustrato se compone de diversos materiales cuyas características suelen diferir en la mayoría de los casos, influyendo notablemente en el comportamiento del conjunto. Además, la presencia o ausencia de agua repercute directamente en las prestaciones del mismo. Efectivamente, tanto la vegetación como el sustrato son materiales complejos, cuya caracterización difícilmente puede ser unívoca, al ser siempre determinantes las condiciones de contorno.

En la actualidad, existen muchos tipos de fachadas vegetales, la mayoría basados en principios de funcionamiento similares. Sin embargo, las peculiaridades de cada solución constructiva siempre influyen en su comportamiento global, a veces, de forma determinante. De todos los sistemas existentes en el mercado, los sistemas constituidos por sustrato y vegetación parecen ser los más efectivos desde el punto de vista energético. El sustrato funciona como un aislante térmico natural, debido a su baja conductividad térmica y elevada masa térmica, mientras que la vegetación reduce las ganancias solares gracias a su elevado albedo y a los fenómenos de evapotranspiración que tienen lugar en ella.

Debido a las ventajas destacadas en las investigaciones que existen sobre el tema y a la gran presencia de superficies verticales en los entornos urbanos, la utilización de fachadas vegetales como alternativa energéticamente eficiente parece ser muy prometedora. Sin embargo, la mayoría de las in-

vestigaciones llevadas a cabo hasta el momento se centran en el estudio del comportamiento térmico de fachadas convencionales con elementos vegetales en las capas exteriores. Por tanto, los resultados obtenidos suelen ser significativos únicamente para el caso de estudio analizado, siendo imposible extrapolar las conclusiones obtenidas a otras situaciones debido a la gran cantidad de variables en juego de las que dependen directamente los resultados obtenidos: composición y orientación del cerramiento, características de la vegetación y condiciones climáticas locales. A todo esto se añade que nuestro conocimiento sobre la influencia de los sistemas vegetales en el comportamiento térmico de cerramientos aislados es todavía limitado. Algunos estudios, cuyas conclusiones en la mayoría de los casos se basan en resultados de simulaciones, confirman que el uso de altos niveles de aislamiento podría reducir el efecto de enfriamiento provocado por las superficies vegetales. Sin embargo, al ser la vegetación un elemento difícil de caracterizar y simular, parece necesario seguir analizando datos de monitorizaciones.

En consecuencia, la opción de integrar una fachada vegetal en un edificio suele resultar actualmente poco viable para el proyectista; principalmente por la dificultad de prever los beneficios asociados al sistema, a menos que se disponga de datos tomados bajo las mismas condiciones de la fachada a instalar. Por lo tanto, las nuevas investigaciones tendrán que apoyarse en los resultados obtenidos hasta el momento y centrarse en el desarrollo de nuevos modelos facilitando su aplicación en diferentes ámbitos. Todos estos factores hacen que la investigación en este campo siga siendo dinámica y en continuo avance, con una amplia perspectiva de futuro hacia nuevas vías de desarrollo aún por alcanzar. En este marco general se encuentra la presente

tesis doctoral, pretendiendo aportar nuevos conocimientos en esta línea de investigación.

1.3. Hipótesis de partida

La investigación parte de las siguientes hipótesis:

- los elementos vegetales en cerramientos verticales pueden tener un comportamiento positivo tanto en verano como en invierno incluso utilizando cerramientos aislados;
- a pesar de la gran complejidad de estudiar sistemas vegetales, por ser la vegetación un elemento biológico, es posible generar un modelo de predicción del comportamiento térmico de las fachadas vegetales.

1.4. Objetivos

Los **objetivos generales** de esta tesis doctoral son:

- analizar el comportamiento térmico de una solución constructiva que incorpore un elemento vegetal;
- generar una herramienta flexible que permita predecir el comportamiento térmico de determinados tipos de fachadas vegetales y posibilitar su utilización en contextos diferentes al de estudio.

Paralelamente a los objetivos generales descritos, en el desarrollo de la investigación se han definido unos **objetivos específicos** que se resumen a continuación:

- estudiar y clasificar las soluciones existentes de fachada vegetal, analizando las ventajas y los inconvenientes de cada una de ellas;
- caracterizar térmicamente el elemento vegetal (sustrato más vegetación), eliminando las variables relativas a los materiales que componen el cerramiento y posibilitar su utilización como material de construcción;
- cuantificar el efecto de la capa de vegetación sobre las condiciones térmicas en el interior del edificio durante las diferentes estaciones del año;
- comprobar los efectos del elemento vegetal en cerramientos aislados.

Capítulo 2

Envolventes vegetales en la arquitectura

Coperture e facciate verdi nell' architettura In questo capitolo, attraverso una selezione di casi di studio, si ricostruisce un itinerario storico dell'evoluzione architettonica delle coperture e facciate verdi. Partendo dalle prime testimonianze ritrovate in Egitto e Persia datate 2600 a.C. fino alle modernissime soluzioni tecnologiche adottate in edifici realizzati negli ultimi anni, il percorso si divide in tre tappe principali:

- dai tempi antichi fino al 1865;
- dal 1865 fino alla seconda guerra mondiale;
- dalla post-guerra ai giorni nostri.

In ogni fase analizzata si tiene in considerazione il contesto socio-culturale dell'epoca e le ripercussioni che esso ha avuto su architettura ed edilizia in

generale e sull'applicazione delle soluzioni legate al verde negli edifici in particolare. Il breve percorso storico dimostra che coperture e facciate verdi sono sempre esistite, ma anche che il loro ruolo in relazione agli edifici e alla città si è evoluto nel corso della storia. È facile constatare come si siano alternati momenti nei quali l'integrazione tra naturale ed artificiale fu centrale ad altri nei quali l'architettura fu concepita come totalmente estranea al contesto. Il ruolo che gli involucri verdi hanno svolto negli edifici si è trasformato in base alle esigenze che la società mostrava in ogni momento e al modo di concepire il rapporto tra il verde e il costruito. Nell'attualità sembra che su questo rapporto stiano convergendo aspetti tecnici, ambientali e socio-culturali nei confronti dei quali, il mondo della ricerca da un lato, e il mondo delle costruzioni dall'altro, stanno investendo risorse e conoscenze con l'idea di prefigurare un futuro nel quale la natura possa entrare a far parte dell'architettura non solo come ornamento ma con una propria valenza tecnica.

Desde los más tempranos orígenes de las civilizaciones, arquitectura y vegetación se encuentran estrechamente vinculadas por la característica innata de la condición humana de convivir, participar y disfrutar de la Naturaleza. En la concepción más primitiva de habitáculo, el empleo de la vegetación como material primario más accesible y con mejor respuesta a las necesidades, es una de las relaciones más directas entre el hombre y la vegetación.

Sin embargo, hoy en día la evolución tecnológica otorga múltiples posibilidades a una arquitectura contemporánea que habitualmente persigue la

sofisticación en su desarrollo. A pesar de vivir en un mundo en continua innovación, parece que el sueño o deseo infantil de tener una casa en un árbol es una idea inmutable en el ser humano. Así, probablemente muchos de nosotros hayamos soñado con esta idea utópica de encaramarse a los árboles, a veces como reto personal de desear conquistarlos, o simplemente por disfrutar de las vistas. En cualquier caso, parece que realmente existe algo intrínseco en el subconsciente de la persona, que le empuja a tener ese sentimiento y necesidad de convivir con la Naturaleza. En consecuencia, no es de extrañar que haya sido fuente de inspiración, contemplación, misterio y adoración para grandes artistas, reflejando a través de las distintas disciplinas artísticas las más variadas interpretaciones sobre un tema común, la Naturaleza. De este modo, son numerosos los escultores, arquitectos y pintores que han tratado de apropiarse de la magia que envuelve al bosque como espacio, desde el modo de expresar lo que éste transmite hasta la intención de establecer un diálogo recíproco. Parece por tanto evidente la estrecha relación entre la Naturaleza y los espacios habitados por el hombre, resultado de la necesidad y afán de la condición humana por integrarse, participar, dominar, transformar y convivir con el entorno natural.

Delinear la Historia y la evolución de las envolventes vegetales no es tarea simple. Por un lado, el transcurso de los siglos ha supuesto la destrucción de la mayoría de las realizaciones arquitectónicas que empleaban elementos vegetales. Por otro lado, se añade el tardío interés hacia las características funcionales de la vegetación en relación con la arquitectura, interés que surge a partir de la segunda mitad del siglo XIX.

Como consecuencia de la creciente industrialización y de los consiguientes

procesos de urbanización, es actualmente cuando las consecuencias del escaso nivel de salubridad en las ciudades empiezan considerarse seriamente. Bajo este contexto, la introducción de espacios verdes en los edificios se contempla como una posible solución frente a las precarias condiciones higiénicas en las que se encuentran los barrios densamente poblados de muchas urbes. Introducir espacios verdes en los edificios se ve como una alternativa capaz de proporcionar ambientes más sanos desde el punto de vista tanto higiénico como social. Arquitectos de fama internacional proyectan edificios con cubiertas vegetales, exaltando sus propiedades estéticas y ecológicas, así como, la eficacia de sus cualidades intrínsecas en la mejora de la calidad ambiental. Recorriendo la evolución histórica de las envolventes vegetales, me propongo particularizar y describir las obras que según mi criterio son las más representativas, siendo consciente de que el objetivo no es realizar un análisis exhaustivo.

Efectivamente, las envolventes vegetales siempre han estado presentes en la arquitectura, pero su papel en relación a los edificios y al entorno urbano ha ido evolucionando a lo largo de la Historia. La evolución de las cubiertas y fachadas verdes se puede dividir en tres etapas:

- desde la Antigüedad hasta 1865;
- desde 1865 hasta la Segunda Guerra Mundial;
- desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad.

2.1. Desde la antigüedad hasta 1865

Las descripciones más antiguas, originarias de Egipto y Persia, datan del 2600 a.C. y se refieren a patios y huertos integrados en la vivienda, como medio de subsistencia y confort por la sombra proporcionada. Inicialmente, la forma y la construcción de los jardines se apoyaban en la práctica agrícola, dando lugar, como modelo tipo, al huerto rodeado por una valla. Fiel a sus orígenes, la dimensión y el perímetro del área de cultivo correspondían al delimitado por los campos. Por motivos funcionales, se incorporaban charcas con canalizaciones para el riego, lo cual a su vez suponía un alivio físico para los climas cálidos.

Los jardines colgantes de la antigua Babilonia (*Bab-lim* o *Babil*, puerta de Dios) son los más conocidos de la Historia. Babilonia, ubicada en el actual Iraq al este del río Éufrates y 90 km al sur de Bagdad, se encontraba en la principal ruta mercantil terrestre que conectaba el Golfo Pérsico y el Mediterráneo. Los jardines construidos por Nabucodonosor II entre los años 605 y 562 a.C. son considerados una de Las Siete Maravillas del Mundo Antiguo. Ocupaban una superficie aproximada de 1600 m² y eran terrazas escalonadas construidas sobre un edificio abovedado. Las técnicas de construcción y mantenimiento empleadas eran muy avanzadas para la época en la que se realizaron. Las terrazas estaban impermeabilizadas y contaban con una capa de drenaje por debajo de la tierra. Además, el complejo e ingenioso sistema de canalizaciones aseguraba la aportación de agua necesaria para mantener la exótica vegetación de los jardines: pinos, palmas, cipreses, etc. Las terrazas alcanzaban cotas de hasta 90 m, lo cual hacía posible disfrutar de extraordi-

narias panorámicas del valle y del desierto circundante. La rica vegetación de los jardines, especies que rompían con la vegetación autóctona del entorno, sobresalía por encima de los techos blancos de la ciudad, un espectáculo grandioso fuente de inspiración para la tradicional iconografía de las alfombras persas.

En lo referido a Europa, ya desde el siglo IX a.C. en Islandia las poblaciones locales solían cubrir el techo de las viviendas con tierra y césped para aumentar el aislamiento del edificio y así evitar que la nieve se acumulara encima del mismo. Esta tradición se ha mantenido hasta la actualidad en varios países del norte de Europa. De hecho, sobre todo en Islandia y Noruega, no es raro encontrar edificios tradicionales con cubiertas ecológicas. Estos sistemas de cubierta están formados normalmente por una estructura de madera, sobre la que se disponen una capa de suelo y vegetación boca abajo, y superior a esta capa, otra capa de suelo y vegetación. La vegetación colocada boca abajo actúa como capa de aislamiento adicional, ya que una vez seca crea una capa de aire estancada entre tierra y madera.

En Italia, las primeras cubiertas verdes se remontan a los Etruscos, que ya desde el siglo IV a.C. adornaban sus monumentos funerarios con cúmulos de tierra donde plantaban árboles. Algunas de estas construcciones han permanecido hasta nuestros días, pudiendo ser visitadas como la necrópolis de la Banditaccia, en Cerveteri (Roma). Otros testigos importantes del uso de cubiertas verdes en los monumentos funerarios de la Antigüedad son los mausoleos de Augusto (29 a.C.) y Adriano (130 d.C.). Al igual que las tumbas etruscas, estos majestuosos monumentos, de 87m y 64m de diámetro respectivamente, fueron ornados con cúmulos de tierra en los que se planta-

ron cipreses y diferentes especies vegetales que simbolizaban la gloria eterna. La vegetación también se integraba en edificios de carácter civil. Muchas villas construidas a partir del siglo I a.C. contaban con la presencia de jardines colgantes a diferentes niveles, de gran potencial estético y función principalmente decorativa. Se pueden citar como ejemplos la Villa Adriana en Tivoli (Roma), una de las villas más magnificente de la época mandada construir por el emperador Adriano, y la Villa Laurentina de Plinio el Joven, minuciosamente descrita en sus *Cartas*. En ambas construcciones, los jardines colgantes estaban estrictamente vinculados a las partes edificadas y, al mismo, tiempo se localizaban en lugares privilegiados a fin de proporcionar las mejores vistas del paisaje circundante.

En esta misma época también se utilizaban sistemas que propiciaban el crecimiento vertical de la vegetación. Así, las primeras fachadas vegetales surgen aprovechando la capacidad de fácil desarrollo vertical de determinadas especies e incorporando elementos apropiados de apoyo. Tal y como se aprecia en las paredes pintadas en la Villa de P. Fannius Synistor en Pompeya, la vegetación crecía en vertical mediante estructuras en pérgola dando lugar a elegantes artefactos capaces de integrar Naturaleza y Arquitectura.

Tras la caída del Imperio Romano, los jardines en general y los colgantes en particular fueron perdiendo su importancia, siendo en la Edad Media cuando los jardines colgantes volverían a estar presentes en los edificios. Su función estética pasa a ser funcional, siendo su uso aplicado a huertos y cultivo de plantas medicinales en los patios de los monasterios. Durante este periodo, también se empleaban jardines colgantes en las murallas de las ciudades, como medida de prevención contra ataques enemigos. Imaginemos el

poder destructivo de una bala de cañón que cae sobre una cubierta: destruye el espacio libre del entorno y genera una gran cantidad de residuos peligrosos tanto para las personas como para los edificios. Los jardines colgantes contruidos sobre las fortificaciones cumplían con la doble función de amortiguar el impacto y de proteger las paredes. Existen diversas ciudades amuralladas en las que se pueden encontrar jardines colgantes, como en Lucca (Toscana, Italia) y la pequeña Pizzighettone (Lombardia, Italia).

A principios de 1400, gracias al incipiente interés por la cultura romana, se vuelve a dar importancia a la función estética de los jardines colgantes. A partir de este momento, aparece un doble uso de este tipo de jardines: de un lado, artístico y estético como elemento que contribuye a generar espacios maravillosos en grandes villas, y del otro, técnico y defensivo como elemento incorporado en las murallas. El primero en retomar la tradición de la arquitectura romana es Giovanni De' Medici, que en 1451 encargó a Michelozzo la villa de Fiesole, que constituye una ruptura decisiva con la arquitectura de la época. La villa deja de ser una sencilla residencia que alojaba a los dueños de los campos próximos para convertirse en una villa artística, de placer y de arte. Parece que la idea de crear un jardín colgante fue dada a Michelozzo por Alberti, que recuerda a los de Babilonia descritos por Diodoro de Sicilia. Esta villa también simboliza un cambio cultural: ya no se dirige hacia el interior, sino que se abre al exterior. Este mismo aspecto innovador será asumido por Rossellino, a quien el Papa Pío II en 1460 encomienda el Palazzo Piccolomini. El arquitecto aplica aquí la idea del palacio renacentista, convierte la pared en galería, permitiendo así que la la naturaleza çivilizada” del jardín colgante enlace el espacio interior con la inmensidad del paisaje de la Val d'Orcia,

que se pierde en la distancia. Piero Adorno, en su libro “El arte en Italia” hace hincapié en que la parte más interesante del edificio es la que da al jardín colgante con vistas al valle: esta representa el punto de conexión entre el interior de la villa y la naturaleza que lo rodea. El jardín está realizado principalmente con tierra de relleno y se apoya en muros gruesos tras los que se sitúan los establos. Un sofisticado sistema de drenaje evita que el agua se quede estancada y penetre en las habitaciones por debajo del jardín.

A lo largo de los siglos XVI y XVII se construyen suntuosas villas donde el jardín colgante es siempre un elemento de gran protagonismo, tal y como se observa en la Villa Medici, la Villa D’Este en Tivoli o la Villa Aldobrandini en Frascati o el castillo de Saint-Germain-en-Laye de Enrique IV. Otro ejemplo a destacar es la Villa de Versalles, donde André Le Nôtre, diseñador de todo el complejo de jardines, dispone un naranjal encima de las caballerizas reales, a fin de evitar interrumpir la continuidad del parque y enmascarar un ambiente sucio y descuidado. Los jardines colgantes en este momento histórico se diseñan exclusivamente bajo fines estéticos y artísticos, siendo a su vez elementos de distinción de la élite social, limitándose por tanto a villas y mansiones. En Roma, como en otras grandes urbes del Renacimiento, casi todas las villas del siglo XV tienen un jardín colgante que, de acuerdo a gustos o modas, puede ser grande o pequeño, secreto o abierto hacia el exterior, elemento de cobertura de estructuras diversas (los establos de Versalles, las habitaciones de la servidumbre el palacio ducal de Urbino), elemento de conexión con el paisaje circundante (Palacio Piccolomini en Pienza) o, simplemente, un elemento estético. Trabajo maravilloso de este periodo son los jardines colgantes del Vaticano, donde la grandeza del proyecto se fusiona

con la incomparable belleza de su realización.

El uso decorativo de la vegetación pasa también por la experiencia de los *berceau*, pérgolas en forma de bóveda cubiertas de enredaderas, tan comunes en los jardines franceses y holandeses de los siglos XVI y XVII, hasta llegar al arte de la jardinería ornamental que gracias a una forma particular de la poda de árboles y arbustos, permite crear objetos “vivos”. En el siglo XIX, con la desaparición de los medios tradicionales de madera de sauce y mimbre como soporte de la vegetación y la aparición de elementos de hierro y madera, se abren nuevas posibilidades expresivas para los jardines verticales, siendo la obra del francés Hector Horeau la que ofrece ejemplos más interesantes. Sus estructuras ligeras de hierro y cristal se complementan con jardineras suspendidas a gran altura con flores y plantas.

2.2. Desde 1865 hasta la segunda guerra mundial

El primer artista-arquitecto que trabaja con envolventes vegetales en términos de funcionalidad y ecología es Von Rabitz. En 1865 escribe el primer libro sobre la utilidad de los jardines colgantes y los beneficios ecológicos derivados. No es extraño que el estudio técnico de este tipo de elementos vegetales empiece a desarrollarse durante el siglo XIX; ya que es precisamente en este período cuando los elementos vegetales se ven revalorizados no sólo por aspectos estéticos, sino también por su valor social e higiénico. En este sentido, recordamos los estudios de distinguidos sociólogos, como Engels

o Vigorelli, sobre los barrios obreros y su insalubridad debida, entre otras cosas, a la falta de espacios verdes; o el debate sobre la construcción de grandes parques en las ciudades, como el caso de Central Park en Nueva York realizado por Holmsted.

Durante las primeras décadas del siglo XX, arquitectos alemanes como Muthesius, Maab o Schneider entre otros, destacan por haber aplicado vegetación como acabado de fachadas para mejorar la habitabilidad de la ciudad, utilizando plantas trepadoras para cuya instalación se incluían, como mobiliario urbano, elementos de soporte para su adecuado crecimiento.

En la arquitectura residencial de la primera mitad del siglo XX, una de las preocupaciones más importantes era integrar la vivienda y su entorno, tal y como se observa en la obra de Sven Markelius en Suecia, Alvar Aalto en Finlandia y Frank Lloyd Wright en los Estados Unidos. De hecho, este último junto con Le Corbusier consideraban, probablemente basándose en los escritos de Von Rabitz, que las cubiertas verdes ya no eran un capricho para ricos, sino un elemento ecológicamente funcional a recuperar en la estética de la arquitectura popular. Para Le Corbusier el jardín colgante constituía una de las aportaciones más destacadas de la nueva arquitectura, como es descrito en el “*Immeuble villas*” presentado en 1922.

En “Hacia una arquitectura” Le Corbusier propone el uso del techo verde como elemento funcional para fines residenciales. Así, tanto comprende el potencial técnico de este sistema como resalta “el efecto termo-regulador de la masa de la cubierta vegetal, ya que las raíces y la arena permiten que el agua se filtre poco a poco”, traduciéndolo a su vez en una extensión doméstica hacia el exterior. De este modo lo aplica en el proyecto “*Immeuble*

villas”, ciento veinte villas organizadas en cinco plantas, contando cada una de ellas con un jardín privado en la azotea con exuberantes enredaderas que protegen las casas de las miradas desde fuera. En la “*Ville Savoye*” o en la “*Unité d’habitation*” de Marseilla grandes jardineras en la azotea ayudan a definir el espacio de la cubierta.

La depresión económica que marcó los años entre las dos guerras mundiales obligó a los constructores a pasar por alto el sector de la vivienda privada para atender a las grandes obras públicas; de tal manera que arquitectos, paisajistas y urbanistas trabajaban en equipo a fin de abarcar proyectos de ámbito local, regional y nacional.

2.3. Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad

El aumento del coste de la mano de obra y de las materias primas tras la Segunda Guerra Mundial supuso que el diseño arquitectónico comenzara se planteara desde un punto de vista más racional y cuidado, especialmente en Europa y en Asia, donde ciudades enteras serían reconstruidas. En consecuencia, los aspectos prácticos toman relevancia en detrimento, a largo plazo, de una planificación de carácter más experimental. En cuanto a los aportes teóricos y prácticos relacionados con la coexistencia entre arquitectura y naturaleza, cabe destacar las lecciones legadas sobre arquitectura tropical de los años cincuenta de paisajistas como Burle Marx. La integración de arquitectura y vegetación bajo este contexto es un imperativo constante, dada la

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 21

riqueza, densidad y diversidad de especies de plantas propias del entorno natural en estas latitudes. Factor que Burle Marx aprovecha y pone en valor en sus experimentos artísticos, así como, diversas colaboraciones con arquitectos del calibre de Lucio Costa, Le Corbusier y Oscar Niemeyer.

Así, cabe citar el proyecto de paisajismo para el edificio de la compañía Petrobras en Río de Janeiro (1967), donde se plantean áreas abiertas en planta baja rodeando el edificio y doce patios suspendidos orientados a los cuatro vientos. Desde el jardín, la perspectiva ofrece una composición de texturas con predominio de verdes, que reproduce el lenguaje arquitectónico. Los planos horizontales de agua, minerales y vegetación se interconectan en una trama regular y transmiten una cierta calma en contraste con el bullicio de la ciudad que lo envuelve. Al atravesar el jardín, el sonido y el brillo del agua que emerge de los surtidores ofrecen un ritmo más dinámico. Un mural de cemento con bajo relieves salva la diferencia de nivel entre la plaza y la calle inclinada. Todos los patios presentan diferentes diseños y se encuentran suspendidos a una altura equivalente a dos o tres pisos. En algunos se disponen tanques de reserva de agua para incendios, simulados a modo de cantero central. Otros se simulan mediante el juego compositivo de pisos y canteros a través de una disposición variable de las especies vegetales a fin de resistir la fuerza del viento a distintas alturas. De nuevo, el empleo del patio en altura hace referencia al gran arquitecto Le Corbusier: "... el verdadero jardín de la casa no está en el suelo, sino elevado tres metros y medio: este será el jardín colgante. Donde la tierra es seca y sana, y desde donde podrá contemplarse todo el paisaje, mucho mejor que desde abajo...". Principio que, sin duda, la intervención de Burle Marx consigue plasmar a

través del despliegue de diferentes especies con las que tapiza y construye los jardines y patios que comprenden el conjunto del proyecto.

Otro ejemplo significativo de utilización de cubiertas verdes en estos años es el Museo Oakland de California (1961), obra de los arquitectos Kevin Roche y John Dinkeloo. El museo se construye en una parcela rectangular delimitada por cuatro vías importantes de circulación. El programa del edificio consistía en albergar tres museos bajo el mismo techo: el Museo de Historia Natural, el Museo de Historia Cultural y el Museo de Arte. En vez de concebir estos museos como entidades independientes, se pretendía que el proyecto empleara un lenguaje arquitectónico común y así conseguir crear un museo regional en California y sus alrededores. Se trata de un proyecto a gran escala resuelto a través de una composición arquitectónica adaptada tanto a los requerimientos del lugar como del propio encargo. La gran superficie que ocupaba el solar se caracterizaba por una topografía ascendente, del noreste al suroeste. Tomando ventaja de las características del terreno, se crea una topografía “artificial”, relacionada con la natural existente, que consigue vincular proyecto y ciudad mediante redes peatonales que atraviesan la cubierta, conectando las arterias urbanas y creando una entrada diferenciada para cada museo. El complejo se encuentra en el centro de una zona objeto de renovación urbana. Desde el exterior, el conjunto se percibe como un gran jardín con amplias entradas y una serie de terrazas en su interior que se comunican mediante pasadizos. Las galerías están configuradas de tal manera que el techo de unas se convierten en las terrazas de otras. Una calle peatonal es la encargada de conectar los distintos niveles y las correspondientes funciones del museo. Cada área se abre directamente hacia el césped, las

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 23

terrazas, los pasadizos y los amplios tramos de escaleras. Uno de los aspectos más significativos del edificio es la cubierta jardín junto a su tratamiento y a la dinámica creada entre ésta, el edificio y los elementos de circulación citados. También destaca la estudiada colocación de las plantaciones de arbustos y los terraplenes. La altura de los muros que rodean los jardines es la apropiada para permitir sentarse. De esta forma, se consigue crear un espacio a modo de “fortaleza ”separada del exterior o ámbito urbano a través de la tranquilidad recreada en el interior del museo. Para ello, se incluyeron diversas especies vegetales que fueron creciendo paulatinamente desde que se comenzó a construir el complejo, sumergiendo su forma y aportando un exuberante colorido al conjunto.

En España en esta misma época destaca la utilización de envolventes vegetales en algunos edificios privados, sobre todo viviendas, como es el caso de “La Casa Cela” proyectada por José Antonio Corrales y Ramón Vázquez Molezún. Se construye entre 1961 y 1962 en Palma de Mallorca para el escritor Camilo José Cela. La volumetría exterior del conjunto está muy relacionada con la serie de terrazas y planos horizontales. Bajo una clara influencia wrightiana, los arquitectos plantean el edificio como una superposición de planos recortados que definen los tres niveles superiores. Una vez dispuestos, comienza a surgir el volumen interior, más allá de las terrazas, como escondiéndolo. La vivienda está constituida por tres plantas adecuadas al programa requerido por el escritor: un semisótano (servicio, comedor, zona de estar y bodega); planta baja (acceso, garaje, zona de estar, varios dormitorios con servicios y almacén de papel) y planta alta (redacción de la revista que Cela dirigía, biblioteca y dormitorio). La disposición de las plantas a modo de pla-

nos superpuestos, origina una serie de terrazas que se aprovechan tanto para evitar la entrada excesiva de luz en las estancias, como para generar espacios exteriores alrededor de la casa. Estas terrazas constituyen un elemento fundamental en la configuración de la casa. Tras una adecuada impermeabilización de las terrazas, se colocó una capa de tierra y se instaló el jardín. De este modo se conseguía generar un espacio similar al plano de tierra, pero a distinta cota de la de entrada, lo cual ofrecía la ventaja de generar todo un espacio de estar y ocio rodeando la “torre” del despacho. Por último, dentro de la terraza se sitúa un área “volada” y otro espacio que permanece dentro del volumen de la casa.

En Europa, la reconstrucción arquitectónica después de la Segunda Guerra Mundial tuvo lugar principalmente entre los años sesenta y setenta, especialmente en Alemania. Para ello, en ocasiones era de interés prioritario proyectar amplias áreas metropolitanas, en la mayoría de los casos, sin regulación urbana. En consecuencia, fueron surgiendo grandes barrios de muy densa edificación, donde apenas existía espacio para la vegetación. Otro ejemplo en oposición a la tendencia de este periodo es *“Villaggio Matteotti”*, construido por el arquitecto italiano Giancarlo De Carlo en Terni (Italia) en 1969. Este proyecto representativo es muestra del deseo de acercar la arquitectura a la sociedad, haciendo de ésta un arte para y por las personas, en la que los espacios se diseñan con el único anhelo de conseguir el bienestar de aquellos que lo habitan y recorren. El área de actuación se encontraba en una zona de viviendas obreras de una empresa siderúrgica; viviendas en grave estado de abandono que la propia empresa consideró vender a empleados de la misma. Sin embargo, éstos prefirieron una construcción completamente nueva que se

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 25

adaptara a las nuevas necesidades, como era el aumento de densidad del plan urbano. El proyecto consistía en ofrecer 800 viviendas nuevas, para 3000 personas, en un terreno de 20 Ha. El arquitecto incluyó consultas ciudadanas en el proceso proyectual, a fin de involucrar en las fases de proyecto a los futuros residentes. El proceso de diseño no consistía en que los individuos diseñaran y pensaran el proyecto de forma individual y aislada; sino que perseguía que, entre un abanico de posibilidades, los futuros habitantes pudieran elegir la opción que más se adaptara a sus exigencias. Efectivamente, el objetivo era que, entre las posibles soluciones, se llegara a una común que fuera del agrado de todos, fruto del pensamiento colectivo, que al mismo tiempo, pudiera ser llevada a la realidad, garantía de la cual era responsable el arquitecto. No se trataba por tanto de proyectar “para ” los habitantes, sino “con ” ellos. Como resultado de las entrevistas y reuniones realizadas, surgieron las siguientes propuestas:

- 3 plantas como máximo
- entrada directa a cada apartamento (sin vestíbulo común)
- jardines propios y jardines colectivos con parvulario y tiendas

Los recorridos peatonales se resolvieron con pasarelas a la altura de la primera planta, separados del tráfico. Las envolventes vegetales en este proyecto se organizan en cuatro niveles: el primero a nivel de suelo, creando patios entre edificios; el segundo y el tercero en las terrazas y el último en las cubiertas. La vegetación de los patios forma una manta homogénea, mientras que en otros niveles constituye elementos puntuales que caen sobre las fachadas,

embelleciendo el proyecto y favoreciendo el bienestar de los usuarios. El uso de la vegetación integrada en la arquitectura experimentó un notable desarrollo cuando su uso pasó de ser simbólico a práctico, poniendo en valor algunas de las características funcionales y técnicas de las envolventes vegetales. La crisis del petróleo de 1973 supuso una revolución cultural e ideológica en el mundo de la arquitectura, impulsando la investigación hacia tecnologías capaces de reducir el consumo de energía. La búsqueda de fuentes alternativas de energía llevó a explorar sistemas que de alguna manera pudieran facilitar la reducción del consumo energético de los edificios.

Durante estos años nace la que tradicionalmente se llamaría *green architecture*, bajo el impulso socio-cultural ligado a temas medioambientales. Esta tendencia continúa con la tradición de la arquitectura alternativa, de la que Frank Lloyd Wright fue precursor, para colocarse en oposición ideológica y cultural a las corrientes modernas de la época. James Wines, del estudio americano SITE, es reconocido como el padre espiritual de esta forma de concebir la arquitectura. De acuerdo con Wines, la naturaleza tiene un valor más alto que cualquier otra cosa, valor que debe reflejarse en el diseño arquitectónico. Por lo tanto, se le debe asignar un papel preponderante que vaya más allá del lenguaje tradicional de composición de fachada, cubierta, alzado o cualquier otro elemento arquitectónico. La naturaleza ha de concebirse como parte integrante del edificio, en sustitución, si es necesario, de los componentes tradicionales de la arquitectura. No es coincidencia que a finales de los setenta James Wines formalice, por cuenta de la compañía de supermercados *Best*, tres soluciones de diseño cuyo tema principal era la “naturalización artificial”, modelos que de alguna forma se pueden interpretar

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 27

como antecedente del uso de la vegetación en fachada. En el caso del *Forest Building* (Richmond, Virginia) SITE intenta generar un edificio que parece invadido por el bosque, interpretando la situación de partida del proyecto que preveía la construcción de estos grandes almacenes en un área suburbana ocupada por un denso bosque a uno de los lados de la carretera. En el *Terrarium Showroom* (Los Ángeles, California) En el *Hialeah Showroom* (Miami, Florida) el único construido de los tres edificios, SITE reproduce en fachada un microcosmos de la vida vegetal de Miami, colocando palmeras, arena y roca entre el cerramiento de cristal y la estructura de fábrica de ladrillo del interior.

En este proceso de acercamiento hacia el medio ambiente y el paisaje, es mérito reconocido del grupo SITE el haber construido un diálogo fructífero entre las artes plásticas que, a su vez, supuso impulsar la arquitectura hacia problemas ambientales y ecológicos. En este periodo, se observa cómo cada vez más artistas se muestran sensibilizados hacia la protección del medio ambiente, dando lugar a nuevas formas de colaboración entre el arte y la botánica. En esta línea, Francine Larivée, cuya motivación es tanto estética como ecológica, diseña paredes cubiertas de musgo, empleando sustratos innovadores capaces de mantener el musgo vivo artificialmente. Resultado del compromiso ideológico así como de la propia experiencia humana y artística del austriaco Friedensreich Hundertwasser es la obra conocida como “*Neighborhood tree*”. En este proyecto, “el árbol de barrio”, las raíces crecen en una habitación llena de tierra, de modo que las hojas brotan fuera del hueco de la ventana. En sus intervenciones, Hundertwasser utiliza la naturaleza como medio para crear nuevos modelos habitativos “vegetales” donde la vegetación

ocupa diferentes niveles del edificio. Esto no significa que “el verde” sea domesticado, ya que sorprendentemente crece libre, invadiendo los espacios del edificio y recreando un ambiente de alegría y libertad para los ciudadanos. Como en una especie de dimensión religiosa, para Hundertwasser este sistema es la mejor herramienta para dar voz y despertar la conciencia humana frente a la fealdad del mundo.

En este mismo período, Oswald Mathias Ungers, ortodoxo en la práctica arquitectónica, continúa buscando una relación más útil e inteligente entre naturaleza y artificio. Una serie de proyectos realizados en 1979 destacan su sensibilidad hacia temas medioambientales mediante el uso de superficies vegetales y materiales ecológicos, así como, el planteamiento del edificio a partir de la orientación más idónea. Para las casas *Melkerei* en Landstuhl (Alemania) se plantea un uso eficiente de la energía solar, así como, un diseño en el que básicamente una caja se encuentra dentro de otra, a modo de sumatorio de diferentes capas estratigráficas: la casa de piedra en la parte interior, la casa de vidrio en la zona intermedia que corresponde a la zona de compensación térmica, y la casa vegetal en la parte exterior. El resultado es una especie de gazebo fuera de escala, cubierto de plantas trepadoras, donde la naturaleza asume el papel de material real de proyecto capaz de integrar y mejorar la calidad de los edificios a través de la variedad de características botánicas.

Durante la década de los setenta, la difusión de la conciencia ambiental entre la población en Alemania supone el comienzo de un proceso gradual de recuperación de las áreas degradadas y carentes de espacios verdes públicos y privados. La solución más conveniente desde un punto de vista logístico fue

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 29

la utilización de la superficie de las cubiertas de los edificios. En este contexto nace la asociación de constructores para la investigación sobre el paisajismo FFL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau), con el objetivo de recuperar y mejorar las condiciones de vida en ambientes degradados. Esta asociación logra que, a principios de los años setenta, se promulgue una ley para la protección del medio ambiente que haría obligatoria la creación de áreas verdes en patios y azoteas de edificios. Esta ley imponía que en las nuevas construcciones se previera una superficie verde proporcional al volumen del edificio, utilizando con este fin las cubiertas.

A mediados de los años ochenta, alrededor de tres mil municipios alemanes financiaron la construcción de cubiertas vegetales con un incentivo de 25 marcos por metro cuadrado como mínimo, hasta 100 marcos para el caso de Berlín. En 1989, con la unificación de Alemania y los subsiguientes problemas que este hecho conllevó, los fondos destinados al propósito citado se vieron reducidos. Esta nueva realidad se mantuvo hasta que la presión administrativa y popular impulsó nuevamente las cubiertas verdes. Claro ejemplo es la ciudad de Mannheim, donde el gobierno impuso por ley que todos los techos de la zona central fueran cubiertos con cubiertas vegetales de acuerdo con el proyecto llevado a cabo por Neils Ghoms, ingeniero jefe de la propia administración. El caso de Mannheim se convirtió en un ejemplo de renacimiento de las cubiertas vegetales en la Alemania unida. De este modo, otras ciudades fueron adoptando una política de recuperación de las áreas verdes, ofreciendo la devolución de 25 marcos por metro cuadrado para todas las superficie de cubierta que se trasformaran en cubiertas vegetales.

Por otro lado, el potencial de la vegetación como material de diseño ar-

quitectónico es investigado también por arquitectos alemanes de fama internacional, entre ellos Thomas Herzog y Otto Steidle. Su interés parte del uso de la vegetación como sistema pasivo de ahorro de energía con el fin de crear zonas de compensación térmica, a través de diversos sistemas y técnicas reproducidas en muchos de sus proyectos posteriores. Destaca en estos años el proyecto social de la Ufa-Fabrik de Berlín. Se trataba de un espacio dedicado a la convivencia social, que mezclaba diferentes enfoques culturales, revisiones del concepto de alimentación y, en general, todo lo relacionado con la ecología.

Este proyecto nace sobre las antiguas instalaciones de la productora de cine alemán UFA-Film, evitando su demolición y dándole así una nueva vida. Este carácter social y cultural impregnará el desarrollo del conjunto de la reforma de las instalaciones. Por tanto, la ecología y el respeto por el medio ambiente serán el eje sobre el que giren todas las modificaciones constructivas, energéticas, así como, tratamiento de residuos o reutilización de aguas. La sostenibilidad medioambiental del proyecto se adopta con una visión global, aspecto relevante desde el inicio de su construcción hasta la actualidad, aplicando diversas estrategias a fin de satisfacer las necesidades del proyecto. Las cubiertas originales de la Ufa-Fabrik eran cubiertas planas no transitables con acabado asfáltico y sin aislamiento térmico. A principios de los ochenta, se lleva a cabo la instalación de las cubiertas verdes, considerando la instalación de una cubierta ecológica extensiva como la mejor solución a los problemas y necesidades del centro. Una mezcla de arcilla expandida y pizarra se emplea como sustrato, por tratarse de una solución ligera. Respecto de la vegetación, se plantan gramíneas, hierbas y pequeños arbustos

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 31

autóctonos sobre una capa de sustrato de espesor variable. Así nos encontramos que en función del espesor del sustrato las especies que en ellas crecen son diferentes. Este es el caso también de la cubierta del edificio Eco-exposición, donde el espesor del sustrato es el menor de todas las cubiertas del complejo, donde han conseguido sobrevivir diferentes tipos de *sedum* plantados originalmente. En otros edificios de la Ufa-Fabrik, como es el caso de la sala de exposiciones y del café, el hecho de que los árboles próximos den sombra sobre la cubierta hace posible que en ella puedan crecer gramíneas y geranios. Además de cubiertas ecológicas, se instalan diversos sistemas de envolvente vegetal en fachada como es el sistema con cable de acero, que incorpora diferentes especies de plantas como la aristoloquia o la madreselva. En otras fachadas del complejo, siempre atendiendo a la orientación e intensidad del soleado se instalan fachadas vegetales que incorporan plantas trepadoras: parra virgen, hortensias trepadoras o hiedra. En general, todo el proyecto vegetal de la Ufa-Fabrik se basa en principios de observación y experimentación. De este modo, el procedimiento consistía primeramente en elegir las especies adecuadas para cada caso de aplicación en base a conocimientos teóricos y, en segundo lugar, de un modo experimental, en observar la respuesta de las especies vegetales plantadas, a fin de determinar el grado de idoneidad de las mismas en relación a los casos tratados.

También en la década de los ochenta, cabe destacar el *Palais Omnisports* de Paris-Bercy. Este proyecto forma parte del comienzo de la transformación sufrida por la zona este de París, constituyendo el primero de una serie de proyectos relevantes como la Biblioteca Nacional, el parque de Bercy o el Ministerio de las Finanzas. La construcción del *Palais Omnisports* viene mo-

tivada por la necesidad de equipar a la ciudad con un nuevo espacio cultural y deportivo moderno que pueda albergar parte de la gran oferta musical y deportiva que París demandaba. En lo referente al ámbito constructivo, se eligió una estructura mixta de hormigón y acero diseñada por el ingeniero Jean Prouvé, ocupando una superficie total aproximada de 55 000 m² y siendo el aforo de 17.000 localidades. La intervención en fachada resulta ser lo más llamativo de la edificación, siendo esta solución constructiva muy semejante a la propia de una cubierta verde. A partir del tratamiento de las fachadas vegetales, se logra una configuración piramidal del edificio y aún mayor vistosidad en su acabado. De este modo, se consigue una imagen exterior más moderna a través de la disposición inclinada en cuarenta y cinco grados de las paredes verdes, inclinación sobre la que se intercalan las escaleras exteriores que permiten acceder al edificio a distintas alturas. También resulta llamativo el tratamiento de la planta de cubierta del edificio, ya que su forma octogonal contribuye a acentuar aún más las aristas de la envolvente. El sistema empleado para la construcción de las fachadas vegetales resulta ser muy similar al de una cubierta inclinada prevegetada. El recubrimiento se llevó a cabo mediante un sistema de panes de césped que precisó de un sistema de anclaje especial, debido a la gran inclinación de la superficie de apoyo. Sin embargo, el condicionante de la pendiente permitió, por otro lado, simplificar el proceso de construcción en lo que a drenaje se refiere, prescindiendo de cualquier tipo de instalación de drenaje. Cabe destacar, a modo de curiosidad, que tanto el riego como el corte de césped están automatizados, habiéndose instalado un sistema de cables y poleas que efectúa mecánicamente el corte de césped.

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 33

En Italia, los primeros proyectos experimentales relacionados con el uso de fachadas vegetales se ven representados en el proyecto de Roberto Gabetti e Aimaro Isola para la Quinta Oficina SNAM en San Donato Milanese (1985). Se trata de un edificio comercial en el que se consigue, a gran escala, una integración estructural entre la vegetación y el edificio. El proyecto preveía abundante vegetación vertical en el interior de una fachada doble de vidrio además de cubiertas vegetales. Esta solución funcionaba, por un lado, como sistema de control micro-climático y, por otro lado, como sistema capaz de aumentar el confort y el bienestar en los lugares de trabajo. Durante esta década, destaca en Asia la utilización de cubiertas vegetales en el *Raffles City Shopping Centre*, complejo diseñado por Leoh Ming Pei en el centro de Singapur. Este complejo se circunscribe en el contexto socio-cultural de crecimiento económico que este estado insular experimentaría desde su independencia en 1965. Efectivamente, este macro complejo de lujo representara al sector social que comenzaba a crecer gracias a las inversiones internacionales, resultado de la situación geográfica de Singapur como puerto estratégico de paso obligatorio entre el Índico y el Pacífico. Esto supondrá que la década de los ochenta se presente como una etapa de apertura y de crecimiento para la ciudad de Singapur, una vez superados los problemas de carácter económico y social de los setenta.

La relación del proyecto de Pei con el entorno está marcada por el hecho de encontrarse ligeramente alejado de la mayoría de los rascacielos de la ciudad, rodeado de edificios de poca altura, que a su vez destacan la notable altura de la intervención. El *Raffles City Shopping Centre* ocupa una manzana y está compuesto por cinco edificaciones de distinta altura, destacando

la *Raffles City Tower* de 72 pisos. Mi análisis se centra en los edificios con cubierta vegetal: *Raffles City Shopping Centre* y el *Swissotel The Stamford*. A altura de la planta 40 del *Swissotel* nos encontramos con una cubierta ajardinada transitable que alberga además una piscina. El objeto de este tipo de cubierta no es tanto aprovechar las grandes ventajas que puede ofrecer una cubierta verde sobre una cubierta tradicional como ofrecer un lugar de descanso a los huéspedes del hotel a tal altura, lejos del ambiente de la calle y con unas agradables vistas. En el caso de la cubierta verde del *Raffles City Shopping Centre*, que cubre el edificio más bajo del complejo, su objetivo resulta aún más curioso y viene condicionado por la coyuntura territorial de la propia ciudad. El estado de Singapur se haya muy masificado desde hace décadas. Al tratarse de una pequeña isla, apenas existen zonas dentro de los límites de su territorio que puedan destinarse al cultivo de alimentos para la población. En este marco nace la iniciativa “Food from the roof” de la que esta cubierta forma parte. Se trata de aprovechar la superficie de cubierta de determinados edificios de la ciudad para instalar pequeños huertos urbanos. Esta práctica se encuentra aún más extendida en la actualidad, creciendo el número de huertos presentes en la ciudad gracias a las nuevas técnicas avanzadas de cultivo en espacios reducidos, como son los cultivos hidropónicos o los cultivos aeropónicos. En el caso del edificio citado de Pei, el huerto instalado en cubierta era un cultivo tradicional.

Ya en los años noventa, surgen formas más refinadas de manipulación del verde, donde la vegetación se integra a la arquitectura. Así lo muestra la obra de arquitectos como Geoffrey Bawa, Bruno Stagno y Enrique Browne, que se identifican con la experiencia de Emilio Ambasz, en una síntesis ideal

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 35

y cultural. A través de una redefinición radical del estatus de la arquitectura, que deja de entenderse como solapamiento de lo artificial y lo natural, Emilio Ambasz conceptualiza el uso de las envolventes vegetales llegando a una notable sugestión figurativa y estética. Apoyándose en el lema “*green over the gray*”, ofrece soluciones formales y técnicas de última generación, capaces de mezclar naturaleza y artificialidad a través de edificios cubiertos de vegetación, capaces de devolver a la ciudad la parte de verde que le ha sido arrebatada. Los enormes muros vegetales de sus edificios adquieren inteligencia, convirtiéndose en una membrana permeable capaz de transformarse en un interesante dispositivo interactivo que, por un lado, instaura un diálogo con los usuarios del edificio y, por otro lado, establece una relación con la naturaleza circundante. Un ejemplo claro de esta filosofía es el edificio “*ACROS (Asian Crossroad Over the Sea)*” en Fukuoka (Japón). Este proyecto debía integrar un amplio programa y un parque ya existente, el Tenjin Central Park. Para ello, el arquitecto crea un edificio que se comporta como una montaña piramidal respecto del parque y como un edificio respecto del distrito financiero en la zona norte. En el proyecto se decide evitar crear un edificio que sea independiente del parque. Por el contrario, se persigue que ambos se fundan como un solo elemento, dando continuidad al elemento vegetal en toda la parcela. Hacia el sur, zona donde se extiende el parque, el proyecto se desenvuelve como parte de éste, elevando una zona del parque en diferentes terrazas. En las fachadas este, norte y oeste el edificio tiene carácter público, a modo de edificio convencional con fachadas de muro cortina. La fachada sur se compone de 14 plataformas aterrazadas, cubiertas por jardines. A través de esta vegetación se permite la entrada de luz difusa

al interior del edificio. Las terrazas son espacios muy vividos por la comunidad. En la terraza superior además se crea un gran mirador desde donde tener una vista privilegiada de la ciudad. En las terrazas se intercalan también láminas de agua y cascadas que permiten el movimiento de agua de un tramo a otro. La continuidad de esta fachada tan verde sólo es interrumpida por la configuración en forma triangular de la gran entrada; la cual evoca la entrada a una cueva, es decir, “la entrada a la montaña”. Un cilindro de vidrio que permite la entrada de luz directa a un interior que alberga un espacio multiusos: hall de exposiciones, museo, auditorio, salas de conferencias, oficinas gubernamentales, oficinas privadas y zonas comerciales. El área verde comprende 5.400 m^2 , constituyendo una de las cubiertas vegetales más extensas del mundo. Cuando se construyó se plantaron 76 especies diferentes, un total de 37.000 plantas. Sin embargo, gracias a las especies de aves e insectos que fueron colonizando el parque, ya existen 120 variedades y unas 50.000 plantas.

Uno de los edificios más conocidos del arquitecto chileno Enrique Browne es sin duda el “Edificio Consorcio”, construido en 1993 en Santiago de Chile. El programa del concurso requería la construcción de $19\,000\text{ m}^2$ sobre rasante y plantas libres de unos 1200 m^2 , subdivisibles en dos. Se crearían dos accesos, uno para la zona perteneciente a la compañía (los tres primeros pisos) y otra para el resto que podría alquilarse o venderse. Además, la imagen del proyecto no debía pasar de moda, perdurando con paso del tiempo. La utilización de vegetación en fachada es una de las características más destacadas del edificio, siendo su función principal la de proteger el interior de la radiación solar directa. En la fachada principal, orientada a oeste, se divide la superficie

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 37

en tres bloques. En cada uno de ellos se proyectan jardineras, de las que parten estructuras metálicas que cubren 4 plantas cada una. La estructura se separa 1.4 m del cerramiento del edificio de manera que se crea un paso lo bastante amplio para el mantenimiento de las plantas, además de un espacio para las corrientes de aire que permiten el enfriamiento del edificio. De la elección de las especies de plantas se encargó Juan Grimm, que proyecta unas enredaderas de hoja caduca (buganvillas, ampelopsis y plumbagos) que irían cambiando a lo largo del año y permitirían mayor paso de luz y calor en los meses fríos. Las plantas elegidas permiten regular su permeabilidad, y ofrecer protección tanto térmica como contra el ruido de la ciudad. Desde su construcción, este edificio se ha convertido en un hito de barrio, siempre cubriendo una ocupación del 100 % y contando con muchos premios tras dos años desde su inauguración hasta la actualidad.

A través de las innovaciones técnicas introducidas en 1988, con la patente de Patric Blanc, se pone de moda revestir con vegetación las paredes interiores y las fachadas exteriores de los edificios, según un neo-romanticismo dirigido a la recuperación de una naturaleza salvaje y exótica, de la que este sistema pretende ser mimesis. La solución propuesta por Blanc se basa en estudios realizados en el sotobosque tropical, donde la vegetación crece en condiciones especiales adaptándose a las duras condiciones que la rodea. La innovación de su sistema radica en el aprovechamiento de la capacidad de las raíces para desarrollarse en los troncos y rocas sin requerir sustrato. Los jardines verticales de Blanc están diseñados como *mixed borders*, donde las diferentes esencias dibujan una especie de pintura impresionista, gracias a su variedad botánica, los colores de las flores y la sombra de las hojas. Esta

configuración compositiva parece referirse explícitamente a la teoría de los colores tonales desarrollada por la paisajista inglesa Gertrude Jekyll entre finales del siglo XIX y principios del XX. Este tipo de jardín vertical ha estimulado la creatividad de muchas *archistar* del firmamento arquitectónico internacional, con la participación de figuras como Jean Nouvel, con el que Blanc ha establecido una fecunda colaboración, así como, Herzog y De Meuron entre otros. Este salto al jardín vertical parece en parte justificado por lo que Gilles Clément llama “El tercer paisaje” y lo que en las teorías de Rem Koolhaas se define como “*Junkspace*”. En base a estas nuevas teorías, áreas olvidadas de la ciudad pueden ser repensadas y enriquecidas artificialmente con la vegetación. De este modo es posible que formas antropogénicas y naturales de biodiversidad puedan convivir, prevaleciendo la idea de dar vida a un paisaje abstracto, capaz de simular bosques, recreando lugares donde el juego entre natural y artificial sea difuso.

La vegetación se convierte en uno de tantos materiales innovadores a disposición de la arquitectura. La vegetación como dispositivo útil para el diálogo interactivo entre las personas y el medio ambiente; dispositivo que se apoya en lógicas estéticas, capaz de transformar su carácter según los requerimientos del proyecto: *camouflage* ecológico, metáfora, máscara, mimesis ambiental o, en base a razones más funcionales, herramienta de control microclimático, recualificación estética, confort y bienestar higrotérmico.

La Fundación Cartier de París constituye uno de los ejemplos construidos en las últimas dos décadas que incorpora fachadas vegetales de Patric Blanc. Este proyecto es muestra de la estrecha relación entre edificio y vegetación; aspecto deseado por la propia Fundación Cartier al disponer, desde

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 39

un principio, de un solar con un jardín, donde un cedro plantado en 1825 por Chateaubriand constituía uno de los elementos originarios más característicos. En este edificio, el arquitecto Jean Nouvel busca crear una arquitectura de límites imprecisos, sirviéndose del vidrio en fachada, así como, del entramado de estructuras y árboles situados entre el edificio y la acera. El muro vegetal que Patrick Blanc construye se basa en un entramado de elementos artificiales que permite a las plantas asentarse verticalmente y obtener por gravedad sus nutrientes. Mediante unas rejillas de aluminio recubiertas de plástico enganchadas al muro, se cubre la zona con una capa de fieltro sintético para que las plantas se puedan enraizar. Durante el año 2000, se realizan un gran número de proyectos donde se incorporan envolventes vegetales en fachada y en cubierta; proyectos que estudiaré en detalle en el capítulo cuatro, analizando y clasificando los sistemas de fachadas vegetales existentes en la actualidad. Para completar el breve recorrido histórico sobre envolventes vegetales iniciado, considero importante citar algunos de los edificios que poseen cubierta vegetal realizados durante estos últimos años, relevantes por la técnica utilizada, los resultados conseguidos o el contexto en el que se llevaron a cabo.

El Nuevo Museo de la Academia de las Ciencias de California, (San Francisco, E.E.U.U., 2000-2008) proyectado por Renzo Piano ha sido seleccionado tanto por su espectacular e interesante cubierta verde como por respetar el medio ambiente en todo su conjunto, tanto por los materiales empleados como por las medidas pasivas adoptadas. El museo se sitúa en el Golden Gate Park, mismo lugar donde se encontraban los 11 edificios que componían la Academia, elementos icónicos de la ciudad construidos entre 1916 y 1991. Sin

embargo, la construcción del nuevo museo supuso el derribo de la mayoría de ellos, lo cual otorgaría mayor relevancia al diseño escogido por Renzo Piano. El resultado de sustituir estos edificios, tan enraizados en la memoria colectiva, tuvo curiosamente una grata acogida entre los ciudadanos, debido, entre otros aspectos, al firme compromiso ecológico del proyecto. Piano respeta tres elementos históricos de la antigua Academia, como son la entrada al Aquarium y el hall de América del Norte y África, pero, al mismo tiempo, integrándolos dentro de su nueva arquitectura. Tanto la idea de proyecto como el hecho de que el edificio se situara en un paraje natural dentro del extenso parque Golden Gate hacen que la relación entre arquitectura y entorno natural sea máxima. Visto desde el aire, el edificio parece quedar camuflado por la cubierta vegetal, de la misma tonalidad que la vegetación circundante. Este efecto se consigue gracias a la composición en cubierta de plantas nativas del lugar. Cuando uno se aproxima al edificio a través de las vías que atraviesan el parque, una arboleda densa lo rodea, surgiendo repentinamente entre los árboles. La moderna arquitectura que caracteriza al proyecto, relaciona de forma exquisita lo natural con lo urbano, ya que la ciudad queda fuera del parque, oculta, y el edificio se muestra como una prueba de que fuera hay una ciudad del siglo XXI. Las ondulaciones de la cubierta permiten que el aire circule hacia el interior del patio central. Diversos espacios interiores están equipados con lucernarios, de modo que aproximadamente el 90 % de la luz que el edificio requiere se obtiene de manera natural. Por otra parte, la cubierta se extiende sobrepasando en longitud el perímetro de las fachadas exteriores, protegiendo el interior de la luz directa y de la lluvia. La cubierta cuenta con un sistema de recogida y reutilización del agua de lluvia

2.3 Desde la posguerra de la Segunda Guerra Mundial hasta la actualidad 41

para el riego del bosque tropical interior. Esto se consigue gracias al solución constructiva empleada: el jardín queda estructurado en torno a una red de piedras colocadas sobre una malla metálica que permite que el agua se drene para recolectarla.

En este mismo periodo cabe destacar la Escuela de Arte, Diseño y Multimedia de la Universidad Tecnológica de Nanyang (2006) proyectada por CGP Consultants, donde la cubierta del edificio lejos de esconderse en el entorno natural, persigue integrarse en él. Acorde con el programa de este tipo de escuelas, se plantea un edificio desde un punto de vista más artístico, más libre en su concepción que otros edificios del campus. Además, el marco universitario que envuelve el conjunto del proyecto hace aún más viable que un edificio de tales características innovadoras tenga buena acogida. La relación del edificio con su entorno carece de intención mimética, ya que busca una combinación de elementos naturales y artificiales que le permitan integrarse. Se trata de extraer del entorno aquellos aspectos que puedan potenciar el proyecto, empleándolos a su favor, evidenciando así la relación que puede establecerse entre arquitectura y naturaleza a través del propio edificio. De ese modo, se evita que la construcción se perciba como elemento agresor, convirtiéndose, por el contrario, en un mecanismo que se nutre de lo que la naturaleza le ofrece. Ambos sistemas, por tanto, se retroalimentan. El proyecto no se esconde, así lo muestran las cinco plantas de altura que alcanza el edificio. Los muros cortina de sus fachadas evidencian su presencia pero a la vez el uso de las cubiertas vegetales hace que el edificio se muestre como un elemento más dentro del entorno. El edificio se compone de una serie de alas cóncavas que forman en su interior una plaza rehundida que permite au-

mentar el número de plantas con iluminación natural sin elevar en exceso la altura del edificio. Esta plaza junto con los recorridos generados a través de las cubiertas vegetales que enlazan en sus extremos con el suelo constituyen los ejes vertebradores del proyecto. A su vez, se busca esta conexión con la plaza y con otras alas del edificio mediante el uso de estos paños grandes de vidrio en fachada. En términos constructivos, se trata de una cubierta vegetal intensiva que requiere un mantenimiento más exhaustivo y una capa de sustrato de mayor espesor.

El edificio de servicios de la Universidad Femenina Ewha (Seúl, Corea del Sur, 2008), proyectado por Dominique Perrault, se encuentra en un complejo emplazamiento, entre el histórico campus y la ciudad que se extiende hacia el sur. Esta situación demandaba una respuesta de carácter urbano, ya que existía la necesidad de conectar ambos tejidos de la ciudad. Esta premisa es la decisión principal de generación del proyecto, creando un parque y una calle interior públicos. El parque se convierte en así manifiesto de la vida universitaria para la ciudad, teniendo también la calle interior gran vida y movimiento. El proyecto se basa en reconstruir la topografía existente, integrando el edificio en la ladera y configurando el denominado “valle escondido de Ewha”: una profunda brecha de 25 m de ancho y 250 m de largo que divide esta ladera artificial en dos mitades. Así, se genera una avenida, pavimentada de granito, que parte de la cota de la calle más próxima al centro de la ciudad, descendiendo ligeramente hacia el norte y que, tras atravesar un tramo horizontal, se transforma en unas escaleras monumentales que comunican con el resto del campus situado en la parte superior. Las cubiertas de los dos edificios, convertidos en topografía, se ocultan bajo un manto vegetal

que consigue ligar la ciudad y el recinto universitario, borrando los límites del conjunto del edificio. Estas dos bandas ajardinadas sirven como una nueva entrada al campus, además de espacio para actividades deportivas diarias y celebración de festividades y eventos. Estas bandas limitan la avenida interior generada mediante muros de vidrio donde diversos accesos van distribuyéndose a lo largo del recorrido permitiendo la entrada a los edificios a diferentes niveles a través de escaleras dispuestas junto a los paramentos de cristal, exhibiendo al exterior el movimiento interior. Las cubiertas constituyen un manto verde con vegetación de bajo porte y caminos. Al enterrar gran parte de la envolvente e incorporar cubiertas vegetales, Perrault consigue que las pérdidas térmicas en gran parte de la construcción se vean reducidas.

2.4. Conclusiones sobre la presencia de envolventes vegetales en la arquitectura

A partir del breve recorrido histórico sobre envolventes vegetales delineado en estas páginas, se puede comprobar cómo las envolventes vegetales siempre han estado presentes en la arquitectura, evolucionando a lo largo de la Historia su papel en relación a los edificios y al entorno urbano. Su importancia respecto de los edificios ha ido transformándose con el paso del tiempo en base a exigencias sociales y formas diversas de concebir la relación entre naturaleza y artificio. En la actualidad, el campo de las envolventes vegetales se desarrolla según una perspectiva heterogénea, de carácter incierto e impredecible. Se observa cómo cuestiones técnicas, ambientales y socioculturales

van convergiendo en el mundo de la investigación por un lado y en el sector de la construcción por otro. La inversión de recursos y conocimiento sobre envolventes vegetales trata de configurar un futuro en el que cada vez más la naturaleza cobre una función práctica propia, más allá de su reconocido valor decorativo y estético.

Capítulo 3

Estado de la cuestión en el campo de la investigación

Stato dell'arte nel campo della ricerca In questo capitolo si descrive la metodologia utilizzata per analizzare lo stato dell'arte nel campo della ricerca riguardante i sistemi vegetali ed i risultati raggiunti fino a questo momento. Con l'obiettivo di produrre una ricerca bibliografica completa e rappresentativa ed essendo la letteratura scientifica molto vasta, si fissano criteri che permettano da un lato di accedere a un'ampia documentazione e dall'altro di selezionare gli studi più rilevanti per la ricerca. Affinchè l'analisi dei documenti sia ordinata e completa fin dall'inizio si è deciso di utilizzare il database SciVerse Scopus e di stabilire una serie di linee guida da seguire. I criteri di ricerca della documentazione si basano sulla selezione di una serie di parole chiave oltre che su criteri definiti dal database stesso:

- cercare in Titolo, Abstract, Parole chiave;

- *cercare in tutti i tipi di pubblicazione di tutti gli anni;*
- *cercare nelle aree Life Sciences y Physics Sciences.*

Dalla ricerca risultano un totale di 323 documenti, 135 relativi alle facciate verdi e 187 relativi alle coperture verdi. Dopo aver letto i documenti, si selezionano gli studi più significativi per questa tesi. Successivamente si descrivono i risultati più importanti, dividendoli in grandi aree di studio:

- *riduzione della domanda energetica per riscaldamento e raffreddamento;*
- *mitigazione degli effetti dell'isola di calore urbana;*
- *regolazione del ciclo dell'acqua;*
- *filtrazione dei contaminanti presenti nell'aria;*
- *riduzione del rumore negli ambienti urbani.*

Infine si analizzano le conclusioni più rilevanti delle ricerche e si individuano le principali carenze. Tra le conclusioni, le più importanti sono:

- *la presenza di coperture e pareti verdi è in grado di ridurre in modo significativo i carichi di raffreddamento;*
- *i sistemi che prevedono substrato sono più efficienti rispetto ai sistemi che non lo prevedono;*
- *l' evapotraspirazione dipende fortemente dalla disponibilità di acqua nel substrato durante le ore di stress termico;*

- *un'irrigazione regolare fornisce l'acqua necessaria per promuovere questo processo e comporta un effetto di raffreddamento più intenso.*

Le principali carenze sono invece:

- *i periodi di monitoraggio sono di solito brevi e concentrati in estate, rendendo impossibile l'estrapolazione dei risultati ad altre stagioni;*
 - *la maggior parte degli studi sperimentali e delle simulazioni si limitano alle condizioni climatiche locali, ostacolando l'applicazione dei risultati ad altri luoghi;*
 - *il potenziale degli involucri vegetali come sistemi di raffrescamento passivo non è ancora stato indagato sufficientemente per trarre conclusioni chiare;*
 - *la maggior parte degli studi non permette di svincolare i risultati ottenuti dalla composizione del serramento;*
 - *i programmi di simulazione si basano su modelli matematici complessi che richiedono una profonda comprensione delle caratteristiche di substrato e vegetazione.*
-

3.1. Criterios de búsqueda

Siendo tan amplia la documentación científica sobre cubiertas y fachadas vegetales procedí a fijar criterios de búsqueda que permitiesen tanto acceder a gran cantidad de documentación como a seleccionar aquellos estudios más relevantes para la investigación.

A pesar de ello, aún tratando de desarrollar esa búsqueda del modo más exhaustivo posible, soy consciente de no haber podido incluir, dentro de la documentación seleccionada, estudios de claro interés para el curso de mi investigación publicados posteriormente a la realización de la búsqueda y redacción del presente documento, debido al inevitable desfase temporal.

A fin de realizar la búsqueda de forma ordenada, establecí una serie de pautas a seguir desde el principio. Para ello, utilicé SciVerse Scopus. Se trata de una base de datos bibliográfica que cubre aproximadamente 19.500 títulos de más de 5.000 editores internacionales; de los cuales, 16.500 son revistas especializadas en los campos de las ciencias técnicas, médicas y sociales. Además, SciVerse Scopus incorpora, a través de ScirusScopus, un buscador de páginas web científicas. SciVerseScopus es propiedad de Elsevier y está disponible en línea bajo suscripción. Gracias a la suscripción de la Universidad Politécnica de Madrid pude acceder a la base de datos, a través de los ordenadores disponibles en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

Además de ser el dueño de Scopus, Elsevier es también uno de los principales editores de revistas científicas internacionales. Para evitar un posible conflicto de intereses en la selección de las revistas periódicas incluidas en la

base de datos y para mantener una política abierta y transparente, Elsevier nombró una Junta Consultiva independiente que se encargara de hacer la selección. Esta Junta está constituida por científicos procedentes de todas las disciplinas científicas y áreas geográficas, siendo el interés principal permitir el acceso de la comunidad científica a toda la información pertinente, independientemente de los editores.

El criterio de búsqueda de documentación que elegí se basa en seleccionar previamente una serie de palabras clave, en paralelo a los criterios pautados por la base de datos empleada:

- buscar en *Título, Resumen, Palabras claves*;
- buscar en todos los tipos de publicaciones de todos los años;
- buscar en las áreas “Ciencias de la Vida” y “Ciencias Físicas”.

Para las fachadas vegetales, las palabras claves utilizadas en la búsqueda fueron las siguientes:

- *biofaçade*;
- *”façade greening”*;
- *”green façade”*;
- *”greening design”*;
- *”green wall”*;
- *”living wall system”*;

- *"plant covered wall"*;
- *"vegetated facade"*;
- *"vertical greenery"*;
- *"vertical greening"*.

Debido al gran número de publicaciones existentes sobre cubiertas verdes, las palabras clave utilizadas para cada búsqueda tuvieron que ser combinaciones de varios términos que incluyeran las temáticas más relevantes para la investigación:

- *analysis & "green roof" & energy*;
- *characterization & "green roof"*;
- *energy & "green roof" & performance*;
- *experimental & measurement & "green roof"*;
- *monitoring & "green roof"*;
- *"numerical model" & "green roof"*;
- *"numerical modelling" & "green roof"*;
- *simulation & "green roof" & energy*;
- *simulation & "green roof" & thermal*;
- *statistics & "green roof"*;
- *time & series & "green roof"*.

Tras la búsqueda de documentación, detecté que las cubiertas vegetales siempre se denotan mediante el término “green roof”, mientras que para fachadas vegetales, la terminología empleada es más diversa. En resumen, la búsqueda resultó en un total de 323 documentos así repartidos:

- 135 documentos sobre fachadas vegetales;
- 187 documentos sobre cubiertas vegetales.

Algunos de los documentos satisfacían más de un criterio de búsqueda, apareciendo más de una vez tal y como se indica a continuación:

- 236 documentos aparecen aparecían sólo una vez;
- 66 documentos aparecen aparecían dos veces;
- 16 documentos aparecen aparecían tres veces;
- 4 documentos aparecen aparecían 4 veces;
- 1 documento aparece aparecían 5 veces.

Los títulos, autores y fuentes de toda la documentación resultante se encuentra catalogada en anejo número 1.

3.2. Selección de los estudios más significativos para la investigación

Una vez leídos los documentos resultantes de la búsqueda, se han seleccionados los estudios más significativos para la presente investigación.

A continuación, se reseñan dichos estudios, describiendo en primer lugar los referidos a cubiertas vegetales y, en segundo lugar, los referidos a fachadas vegetales. En ambos apartados, la documentación se presenta ordenada por fecha de publicación, de la más antigua a la más actual. En el caso de estudios publicados en el mismo año, aparecen primeramente aquellos cuya fecha de aceptación definitiva en la revista sea anterior.

Analysis of the green roof thermal properties and investigation on its energy performance

A.Niachou, K. Papakonstantinou, M.Santamouris, A. Tsangrassoulis, G. Mihalakakou

Energy and Buildings, 2001

Esta investigación se llevó a cabo en un edificio situado en la región de Loutraki, cerca de Atenas.

Los objetivos de este estudio eran:

- estimar la influencia de la ubicación de un cubierta verde en el micro-clima del ambiente interior y exterior de los edificios;
- evaluar las propiedades térmicas de la cubierta verde a través de un enfoque tanto experimental como matemático;
- calcular el impacto de la cubierta verde en el consumo total de energía de los edificios.

El estudio se realiza en dos fases. Durante el verano de 2000, se llevó a cabo la primera fase, de carácter experimental, donde se analizaron las temperaturas exteriores e interiores de algunos techos verdes en comparación con

otras cubiertas realizadas con materiales convencionales. Durante la segunda fase, se analizaron las propiedades térmicas del techo verde mediante un modelo computacional.

Desde las primeras mediciones, se detecta cómo la temperatura superficial de las cubiertas está estrictamente relacionada con el material de acabado. En el caso del techo verde, la temperatura varía en base a la vegetación empleada. De este modo, las temperaturas más bajas registradas corresponden a una vegetación densa de color verde oscuro. En general, la temperatura superficial del techo verde es del orden de 10°C inferior a la temperatura superficial de la cubierta convencional.

El análisis de las temperaturas interiores de los edificios se efectuó en evolución libre durante dos semanas, estando los edificios vacíos. Del estudio de un día típico, se observa que:

- en el edificio con cubierta convencional, la temperatura del aire supera los 30°C en el 68 % de las mediciones realizadas; mientras que, en el edificio con cubierta verde, dicha temperatura solo se supera el 15 % de las veces;
- la diferencia entre la temperatura máxima y la temperatura mínima registrada durante el día es de 7°C en el caso del edificio con cubierta convencional y de 4°C en el caso del edificio con cubierta verde.

Con el fin de estimar las propiedades térmicas de la cubierta verde y de evaluar su comportamiento térmico durante todo el año, se calculó la transmitancia térmica de diez soluciones de cubierta, con y sin vegetación, diferenciadas a su vez en tipos según el grado de aislamiento:

tipo 1 : sin aislamiento;

tipo 2 : aislamiento medio;

tipo 3 : alto aislamiento.

Esta estimación se realizó a partir de la información proporcionada por los fabricantes de cada solución de cubierta a través del programa informático TRNSYS. Según los resultados obtenidos, las transmitancias térmicas de las cubiertas consideradas varían desde un máximo de $18.18 \text{ W/m}^2\text{K}$ para cubiertas sin aislamiento hasta un mínimo de $0.26 \text{ W/m}^2\text{K}$ para las cubiertas con 15 cm de aislamiento. Posteriormente, se estimaron las transmitancias térmicas de estas mismas soluciones una vez aplicada una capa de sustrato más vegetación. En este caso, los valores oscilan entre un máximo de $1.99 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la cubierta sin aislamiento y un mínimo de $0.24 \text{ W/m}^2\text{K}$ para la cubierta con 15 cm de aislamiento.

Tomando estos valores de transmitancia, se simuló el edificio con el objetivo de analizar la demanda energética en cada uno de los veinte casos objeto de estudio.

Las condiciones interiores de simulación fueron las típicas de un edificio de oficinas, considerando los siguientes escenarios:

A : sin ventilación nocturna;

B : con ventilación nocturna en verano de 4 ACH;

C : con ventilación nocturna en verano de 10 ACH.

Los resultados muestran cómo la cubierta verde reduce la demanda energética del edificio en un 44 % para la solución con transmitancia más alta; y de un

2 %, para la solución con transmitancia más baja. En cuanto a las cubiertas no aisladas de los escenarios B y C, la demanda energética de refrigeración disminuye desde un 54 % (4 ACH) hasta un 61 % (10 ACH). En el caso de edificios con aislamiento moderado, los valores se reducen a un 9 % (4 ACH) y un 12 % (10 ACH) hasta llegar a los edificios con alto nivel de aislamiento, donde apenas hay diferencia de demanda energética de refrigeración entre la solución convencional y la solución con cubierta vegetal.

Estos resultados están relacionados con el comportamiento de la cubierta verde en condiciones de verano, ya que ésta contribuye a mantener la temperatura del aire más baja durante el día y, más elevada, durante la noche.

Así, la ventilación nocturna favorece la conservación de la temperatura inferior del aire no sólo durante la noche sino también durante el día.

El consumo de energía de los edificios con cubierta verde es menor que el de aquellos con cubierta convencional, pudiendo mejorar su funcionamiento en verano mediante ventilación nocturna. Por otro lado, el ahorro de energía es mayor en el periodo de invierno y también en los edificios con aislamiento moderado, en comparación con las cubiertas muy aisladas.

Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique

Theodore G. Theodosiou

Energy and Buildings, 2003

Esta investigación propone una metodología para la inclusión de las herramientas de modelización de las cubiertas verdes en los programas de simulación energética de los edificios. La base de partida es una versión modificada

del modelo analítico desarrollado por Palomo Del Barrio. Los resultados son validados por el uso de datos reales tomados de una construcción existente en zona mediterránea. Una vez validado el modelo, se realiza un estudio paramétrico para evaluar las principales características de las cubiertas ecológicas que afectan a su rendimiento energético.

El modelo analítico tomado es un modelo matemático de elementos finitos resuelto a través del método de Gauss-Seidel. La cubierta verde se representó a través de un modelo físico con 21 nodos. Este número relativamente elevado de nodos se justifica tanto por la naturaleza compleja del tema como por la necesidad de una extensa validación durante el período de medición. De hecho, la variación de algunas propiedades termofísicas de las capas vegetales de acuerdo a las condiciones meteorológicas tiempo y contenido de agua, no permiten ni la agrupación ni la simplificación de estas capas a través del uso de valores de transmitancia constantes, a diferencia de lo que ocurre con la mayoría de materiales.

A fin de incorporar en el modelo la interacción térmica entre el edificio y la parte ajardinada de la cubierta verde, se creó una zona térmica externa que representara todas las capas situadas por encima de la parte estructural. Las condiciones de temperatura en esta zona térmica se calcularon a través del modelo. Esta técnica fuerza la herramienta de simulación a interpretar la parte ajardinada como una zona térmica del edificio, con volumen y capacidad térmica iguales a cero. Esta zona no presentaba intercambios de energía con el medio ambiente a excepción de de su parte inferior, o capa externa estructural del techo. En teoría, las temperaturas se controlaban mediante un sistema de aire acondicionado, de hecho, fueron controladas totalmente

por los resultados del modelo analítico calculado para cada paso de tiempo de 1 hora. Estos valores se introdujeron de forma automática en el archivo de entrada del programa para cada hora del período de simulación. Mediante esta técnica, los intercambios de energía entre la cubierta verde y el edificio se llevaron a cabo en la superficie de asfalto, procediendo a su cálculo tal y como se efectuaría con cualquier otro elemento constructivo.

Los resultados indicaban que la cubierta verde afectaba a las condiciones de temperatura del edificio. Para analizar la situación inversa, es decir, la influencia de las condiciones internas del edificio en la temperatura de la cubierta verde, se reintrodujeron como entrada en el modelo analítico los resultados proporcionados por el programa, realizando de nuevo la simulación. Esta operación se repitió hasta que convergieran los resultados de temperatura del modelo analítico y los de la herramienta de simulación durante el periodo completo de simulación, consiguiendo una diferencia máxima de 0.1 °C por lo general, tras dos o tres bucles.

La validación del modelo, realizada comparando los resultados de simulación con los de monitorización, demuestra cómo el modelo es capaz de reproducir el comportamiento térmico del techo verde. Las diferencias entre las temperaturas registradas y simuladas oscilan entre un mínimo del 0 % y un máximo del 15 %.

A continuación, se llevó a cabo un estudio paramétrico para determinar las características de la cubierta ecológica más influyentes en su comportamiento térmico durante el verano. Este análisis se realiza considerando, en cada caso, todos los parámetros constantes menos el parámetro objeto de estudio. El flujo térmico diario que atravesaba la cubierta se tomó como va-

riable de control. Por convenio, se considera positivo el flujo directo hacia la cubierta y negativo el flujo entrante en el edificio.

En el escenario básico, el edificio presentaba las mismas características que el utilizado para el experimento. Se trataba de un edificio de oficinas de 70 m² de superficie, ganancias internas de 1.1 kWh durante horas de trabajo (08:00-16:00 h) y 0.1 kWh durante el resto del día. La vegetación estaba caracterizada por un LAI de 3 y una altura de 0,3 m.

Una vez concluido el análisis paramétrico, los resultados más destacables son los siguientes:

- el parámetro más importante de la vegetación es la densidad del follaje, que en el modelo corresponde al LAI. Según el estudio analítico, este parámetro influye en la evapotranspiración y el efecto de sombreadamiento; resultado previsible ya que el LAI afecta a la mayor parte de mecanismos relacionados con el enfriamiento que proporcionan las cubiertas verdestanto la evapotranspiración como el efecto de sombreadamiento están influenciados por él. Cuanto mayor sea la densidad del follaje, tanto mayor será el área foliar total, donde se produce la transpiración. Además, para valores altos de LAI, el suelo y las hojas de las capas inferiores están prácticamente sombreados en su totalidad y completamente protegidas de la radiación solar.
- La altura de las hojas, por sí misma, no es uno de los factores importantes que afectan el rendimiento de la cubierta verde, influye únicamente en combinación con la densidad del follaje.
- El espesor del sustrato tampoco parece representar un factor significati-

vo al considerar comportamiento de la cubierta en verano. Sin embargo, la diferencia entre espesores pequeños y grandes es más notable en condiciones extremas de temperatura en el exterior. De hecho, las cubiertas con grandes espesores de sustrato, debido a la inercia térmica, son capaces de proporcionar enfriamiento en dichas condiciones, a diferencia de lo que ocurre con cubiertas con espesores reducidos.

- El espesor de la capa de aislamiento controla su interacción térmica con el interior del edificio, a pesar de no estar relacionado con la capacidad de las capas ajardinadas, al ser éstas más frías que el aire ambiente. La ausencia de la capa de aislamiento puede asegurar que el flujo de calor se dirija desde el aire interior relativamente caliente hacia las capas más frías de la vegetación. Los niveles altos de aislamiento mitigan este mecanismo de enfriamiento y, aunque ofrezcan protección térmica en invierno, reducen la capacidad de enfriamiento de las cubiertas verdes.
- Las condiciones climáticas juegan un papel importante en la capacidad de enfriamiento de las cubiertas vegetales. A pesar de haber analizado los parámetros climáticos por separado, dando al estudio un enfoque poco realista, se ha demostrado que la humedad relativa es el factor climático más influyente. Esto es válido tanto para techos verdes como para todas aquellas técnicas basadas en mecanismos de evaporación. Un ambiente seco aumenta los procesos de evapotranspiración y enfriamiento. La velocidad del viento ejerce el mismo efecto, fomentando la eliminación de vapor en las hojas y aumentando la evapotranspiración; sin embargo, su efecto sigue siendo más débil que el que pueda ejercer

la humedad relativa. aunque no tan fuerte como la humedad relativa.

Experimental measurements and numerical modelling of a green roof

Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti, Filippo Busato

Energy and buildings, 2005

Los objetivos de este trabajo son evaluar la capacidad de refrigeración pasiva de una cubierta verde, estudiando principalmente el papel de la evapotranspiración en verano; así como valorar la mejora de las propiedades aislantes de la cubierta en invierno.

La investigación se basaba en monitorizar una cubierta ecológica instalada en el Hospital de Vicenza y al mismo tiempo en el desarrollo de un modelo numérico de predicción de las prestaciones térmicas y energéticas de edificios con cubierta ecológica a través del software de simulación TRNSYS.

Este entorno de simulación, con una estructura modular, facilita la adición al programa de modelos matemáticos externos a su biblioteca.

Las sesiones experimentales se realizaron durante los veranos de 2002 y 2003 y del invierno de 2004. La cubierta estudiada tiene una extensión de aproximadamente 1000 m² y se compone de una capa de 20 cm de suelo, una capa de 11 cm de drenaje de polietileno expandido y vegetación sedum.

El sistema de cubierta verde se analizó en estado dinámico unidimensional por el método de diferencias finitas. El sistema físico está dividido en diferentes segmentos y nodos. El suelo se describe con tres nodos (*I*, *II* y *III*), mientras que un nodo describe la capa de drenaje (*d*), la lámina de impermeabilización (*w*) y la capa de hormigón estructural (*c*). El resto de elementos se

desprecian debido a la masa limitada. El borde superior corresponde al aire ambiente y el borde inferior, al aire de la habitación inmediatamente inferior.

Todo el sistema se describe en la figura 3.1, donde los flujos térmicos están indicados con líneas continuas. ET_i es el flujo térmico debido al proceso de evapotranspiración del nodo genérico i . Para los nodos II , III y d el flujo entra en los nodos I , II y III , respectivamente, con signo contrario, lo cual significa que el calor de la evaporación del nodo i es el calor de condensación del nodo superior. $G_{i,j}$ es flujo por conducción entre dos nodos adyacentes y C_i es calor acumulado en cada nodo. A_o y A_i indican los flujos de aducción internos y externos, es decir la suma de flujos convectivos y radiantes.

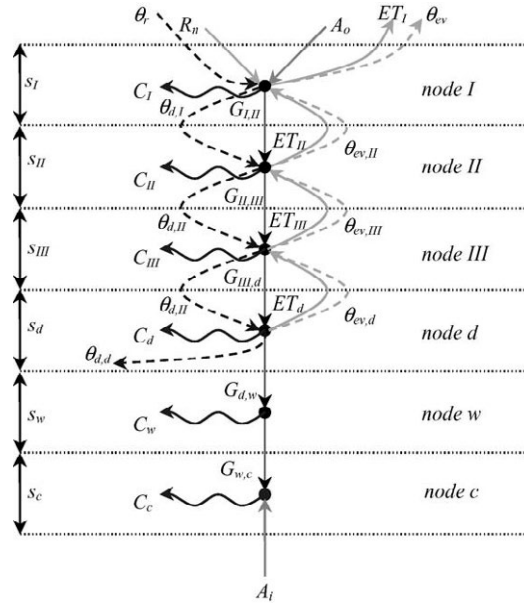


Figura 3.1: The finite differences model of physical system.

Con estos elementos se puede escribir el equilibrio en cada nodo. Por ejemplo, para el nodo I en términos de flujos específicos (vatios por metro

cuadrado) el equilibrio sería:

$$R_n + A_o + ET_{II} = G_{I,II} + ET_I + C_I \quad (3.1)$$

Durante la fase experimental, se midieron la irradiación solar global, la temperatura del aire y la cantidad de lluvia, a fin de evaluar el comportamiento de la cubierta verde mediante las ecuaciones del modelo. Además, se consideró oportuno conocer el historial de la variación de temperatura del suelo según las diferentes profundidades de los nodos. Para ello, se registró la temperatura en la superficie, en un punto a profundidad intermedia y en la interfaz entre el suelo y la capa de drenaje. También, se midieron temperaturas entre la capa de drenaje y la capa de impermeabilización, en la superficie del techo al interior de la habitación y dentro de la habitación.

Por último, se registraron los valores de humedad del suelo. La humedad, aunque no se incluyó en el modelo de análisis, se utilizó para ajustar el modelo de predicción, especialmente para el LAI y los coeficientes de aducción. De hecho, en el equilibrio energético de cada nodo, es posible calcular la evapotranspiración y, por tanto, el flujo de agua. Minimizando la diferencia entre los resultados de contenido de agua del suelo obtenidos experimentalmente y calculados, se encontraron los valores óptimos de LAI y de los coeficientes de aducción.

El proceso de evapotranspiración se estudió durante las temporadas de medición de verano, comparándose el comportamiento de la cubierta verde en condiciones de máxima y mínima humedad. Se eligieron dos periodos de 10 días: el primero, caracterizado por una lluvia de 0,2 mm y una humedad

relativa del suelo del 10 %; el segundo, por una lluvia de 28 mm y el suelo en condiciones de saturación. El promedio diario de irradiación solar incidente durante ambos períodos fue prácticamente el mismo, alrededor de 18 MJ/m^2 y, por tanto, fue posible normalizar a 100 unidades de energía incidente los intercambios de energía entre nodos. El resultado más destacable se refiere a la aducción en el interior: 1,8 unidades de energía de entrada en la habitación durante el periodo seco, frente a las 0,4 unidades de energía de salida en condiciones de humedad. Además de eliminar la ganancia térmica en la azotea, el techo verde contribuyó a la refrigeración pasiva.

La evaluación del ahorro energético debido a la instalación de la cubierta verde se llevó a cabo comparando resultados anteriores con los producidos por una cubierta convencional con un albedo de 0,1 y un coeficiente de aducción de $14 \text{ W/m}^2\text{K}$. El comportamiento de la cubierta tradicional se estimó por medio de una simulación numérica realizada con las mismas condiciones de contorno de la sesión experimental. Los resultados resumidos en la figura 3.2 comparan la atenuación de 100 unidades de radiación solar incidente en el techo.

La primera diferencia detectada se refiere a la reflectividad solar: una cubierta común tiene un albedo de 0,1, mientras que el albedo medido en el techo verde es de 0,23. La segunda atenuación producida por el techo verde se refiere a la absorción solar de la vegetación. Sin estos procesos, la superficie de la cubierta tradicional podría alcanzar una temperatura de 70°C . Ésto explica los altos intercambios de energía en la cubierta convencional y el valor de 4,4 unidades de energía entrante en la habitación inferior. La figura 3.2 muestra cómo, en el caso de la cubierta verde en condiciones de saturación

el flujo de entrada es nulo e incluso se produce un ligero flujo saliente.

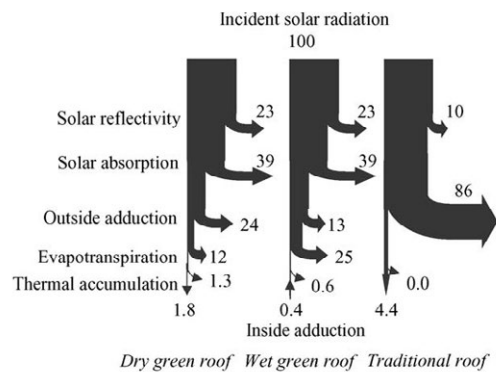


Figura 3.2: Comparison of the energetic exchanges of the dry or wet green roof with a traditional roof, starting from 100 incident solar irradiation units—summer session.

A lo largo del invierno de 2004, caracterizado por una humedad relativa del suelo muy alta, se observa cómo el flujo saliente a través de la cubierta vegetal es mayor que el flujo saliente a través de la cubierta del edificio convencional. En la figura 3.3 se normalizan los valores respecto al promedio diario de irradiación solar incidente (5 MJ/m^2). El motivo por el cual la diferencia entre las dos cubiertas es apenas apreciable se debe a que los valores se calcularon sobre 100 partes de un valor de irradiación media muy bajo.

En una fase posterior, se elaboró un modelo numérico predictivo del comportamiento energético de la cubierta verde a través del desarrollo de un módulo específico en el programa TRNSYS. El modelo, personalizable, se construyó a partir de las variables meteorológicas y de las características ópticas, geométricas y termodinámicas de la cubierta verde.

La correlación entre los resultados obtenidos experimentalmente y los

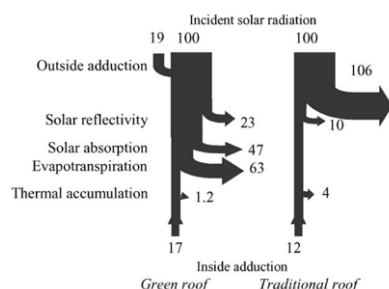


Figura 3.3: Comparison of the energetic exchanges of the green roof with an traditional roof, starting from 100 incident solar irradiation units—winter session.

resultados de la simulación demuestran que el modelo reproduce fielmente el comportamiento de la cubierta cuando el sustrato es húmedo, tanto en verano como en invierno; siendo complicado de reproducir cuando el suelo es seco.

Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece

M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, A. Synnefa, A. Hatzibiros, P. Patargias

Energy, 2007

Este trabajo se ocupa de la investigación experimental y del análisis de la eficiencia energética y ambiental de un sistema de cubierta verde instalado en una guardería en Atenas. La investigación se lleva a cabo en dos fases. Durante la primera fase, se realizó un estudio experimental sobre la eficiencia del sistema de cubierta verde, mientras que en la segunda fase, el ahorro de

energía proporcionado por ella se examinó a través de un modelo matemático. El edificio objeto de estudio tenía dos plantas además de un pequeño sótano. De los 854.9 m² de superficie total acondicionada, 512.5 m² pertenecían a la planta baja y 342.4 m² a la primera planta. El estudio experimental se basó en mediciones de temperatura y humedad relativa exteriores, y temperatura del aire en varias zonas al interior del edificio. Las mediciones se llevaron a cabo con un intervalo de tiempo de una hora durante el período de 4/9/2002 a 12/12/2002. El comportamiento energético del edificio se analizó a través de programa de simulación TRNSYS 15.1.

Se consideraron como variables de entrada los elementos geométricos y constructivos del edificio, los principales parámetros meteorológicos (temperatura ambiente, humedad relativa, radiación total, etc.), la ganancias internas e infiltraciones, así como la ventilación. Las variables de respuesta eran la temperatura del aire interior en cada zona térmica del edificio, el grado de calentamiento y las cargas de calefacción y refrigeración. Estos cálculos tenían por objeto evaluar la eficiencia energética y ambiental de la cubierta verde.

El edificio se dividió en 8 zonas térmicas y en cada una de ellas se calcularon los valores de temperatura del aire. Los resultados de la simulación se compararon con los resultados obtenidos experimentalmente y se comprobó que existía una buena correspondencia entre dos series de valores, siendo las diferencias de temperatura en la mayoría de los casos menores que 1 °C. Efectivamente, para todo el conjunto de datos experimentales, el coeficiente de correlación es 0,92, mientras que el error cuadrático medio es de 0.7 °C.

A la hora de evaluar el ahorro energético debido a la presencia de la cubierta vegetal, se realizaron estimaciones con TRNSYS de las cargas de refrigeración en verano y de calefacción en invierno para todo el edificio y la planta superior. En primer lugar se simuló el edificio con cubierta vegetal y a través de dos series de simulaciones, cada una caracterizada por un programa de distinto de riego en la cubierta.

Se consideraron dos casos de estudio:

a : edificio no aislado;

b : edificio aislado con poliestireno. ; b, edificio aislado con poliestireno.

El edificio contaba con un sistema de calefacción central por combustible y un sistema de enfriamiento eléctrico de unidades split. Los puntos de ajuste temperatura se establecieron como 21 °C para el periodo de calefacción y 26 °C para el período de enfriamiento.

Así, para el período de verano, la reducción de la carga de refrigeración varía para todo el edificio del rango de 15 - 49 % en el caso del edificio no aislado y, del 6-33 %, para el edificio con aislamiento. Paralelamente, la reducción de la carga de refrigeración para la planta superior fluctúa en el caso de estudio sin aislamiento entre 27 % y 87 % y, para el edificio aislado, entre 12 % y 76 %. La variación en la carga de calefacción debida a la cubierta verde es muy pequeña. Estos resultados pueden considerarse muy positivamente, dado que generalmente cualquier estrategia que persiga reducir la carga de refrigeración conlleva, a su vez, un aumento de la carga de calefacción. Por lo tanto, sistemas de techos verdes podrían proporcionar importantes beneficios ambientales, incluyendo la reducción del efecto de isla de calor urbano. Los

materiales urbanos con altos coeficientes de absorción contribuyen en gran medida a elevar la temperatura en las ciudades. Reemplazar estos materiales por elementos vegetales, como pueden ser las cubiertas verdes, contribuiría sustancialmente a mitigar el efecto isla de calor urbano.

De hecho, los valores de temperatura son más altos en los entornos urbanos como consecuencia de una menor disponibilidad de superficies para la evaporación. Las zonas asfaltadas y los edificios absorben grandes cantidades de energía solar, mientras que en las áreas verdes la mayoría de radiación solar se utiliza para la evaporación del agua contenida en tierra y sustrato y crecimiento de las plantas.

A green roof model for building energy simulation programs

D.J. Sailor

Energy and Buildings, 2008

Para este estudio, se seleccionó EnergyPlus como plataforma de simulación para implementar un modelo de techo verde, por ser considerado uno de los programas más avanzados en simulación energética de edificios, respaldado, a su vez, por el Departamento de Energía de Estados Unidos. El programa presenta una estructura modular que permite incorporar con facilidad nuevos módulos.

EnergyPlus se basa en elementos clave de los programas BLAST y DOE-2. El cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos junto con la Universidad de Illinois desarrolló el programa BLAST (*Building Loads Analysis and System Thermodynamics*) a finales de los años 70. En el mismo periodo, el Departamento de Energía desarrolló DOE-2, un código de simulación para

estudiar el comportamiento energético de los edificios. DOE-2 se convirtió en el programa estándar para el sector de la construcción, además de ser motor de cálculo de más de veinte herramientas de simulación. EnergyPlus trata de combinar las mejores características de cada código en un marco modular que facilite el desarrollo en curso y la incorporación de nuevos aspectos por la comunidad de usuarios. El programa fue lanzado por primera vez en abril de 2001, y se actualiza dos veces al año.

Al igual que un techo tradicional, la energía radiante del sol influye en el balance de energía de un techo verde. La radiación solar es equilibrada tanto por los flujos de calor sensible (convección) y latente (evaporación) desde el suelo y desde la superficie de las plantas, como por la conducción de calor en el substrato y la radiación de onda larga (térmica) hacia y desde el suelo y la superficie de las hojas. Este balance de energía se ilustra en la figura 3.4.

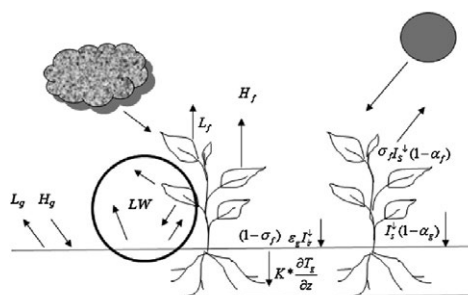


Figura 3.4: The energy balance for a green roof, including latent heat flux (L), sensible heat flux (H), shortwave radiation (Is) and incoming long-wave radiation (Iir). Conduction into the soil and the complex exchange of long-wave (LW) radiation within the canopy are also shown.

El análisis del balance energético del modelo FASST (*Fast All Season Soil Strength*) desarrollado por Frankenstein y Koenig, pertenecientes al Cuerpo

de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, perseguía determinar la capacidad portante de los suelos al entrar en carga vehículos y personas en movimiento y en reposo.

Para ello, se realizó, entre otras cosas, un seguimiento del balance de energía y humedad (incluyendo hielo y nieve) en un suelo vegetado. El modelo unidimensional empleado se basa en gran medida en otros modelos como BATS y SiB. En esta investigación, se implementó el modelo FASST aportando las modificaciones necesarias para adaptarlo a suelos de poco espesor.

El convenio de signos utilizado asume que todos los flujos de calor son positivos cuando la energía es absorbida por la cubierta. El balance energético se divide en el balance de energía de las hojas (F_f) y el del suelo (F_g).

El conjunto de ecuaciones se reduce a la solución simultánea de dos ecuaciones que incluyen las temperaturas de las hojas y de la superficie del suelo. Las dos ecuaciones son las siguientes:

$$F_f = \sigma_f \left[I_s^\downarrow (1 - \alpha_f) + \varepsilon_f I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_f \sigma T_f^4 \right] + \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_f + L_f \quad (3.2)$$

$$F_g = \left(1 - \sigma_f \right) \left[I_s^\downarrow (1 - \alpha_g) + \varepsilon_g I_{ir}^\downarrow - \varepsilon_g \sigma T_g^4 \right] - \frac{\sigma_f \varepsilon_g \varepsilon_f \sigma}{\varepsilon_1} (T_g^4 - T_f^4) + H_g + L_g + K \frac{\partial T_g}{\partial z} \quad (3.3)$$

Antes de utilizar el programa de simulación, el usuario debe aceptar los valores predeterminados, o bien, definir de los siguientes parámetros característicos de la cubierta verde (Ecoroof).

Altura de las plantas: este valor se limita 0.01 m y 1.0 m.

LAI: (*Leaf Area Index*), superficie de área foliar por unidad de superficie de suelo. Este índice es adimensional y se limita en esta aplicación entre 0,001 y 5.

Reflectividad de las hojas: fracción de radiación solar incidente reflejada por la superficie de las hojas. La radiación solar incluye el espectro visible, así como la radiación infrarroja y las longitudes de onda del ultravioleta.

Emisividad de las hojas: relación entre la radiación térmica emitida por la superficie de las hojas y la emitida por un cuerpo negro ideal a la misma temperatura. Este parámetro se utiliza para calcular el intercambio radiante de onda larga en la superficie de las hojas.

Resistencia mínima estomática: resistencia de las plantas al transporte de humedad. Los valores bajos de resistencia estomática se traducen en una mayor evapotranspiración. Los valores pueden variar entre 50 s/m y 300 s/m.

Nombre de la capa de suelo: nombre único de referencia que el usuario asigna a la capa de suelo.

Rugosidad: rugosidad relativa de las hojas. Este parámetro influye sólo en el coeficiente de convección exterior.

Espesor del sustrato: espesor de la capa de suelo [*m*].

Conductividad: conductividad térmica del sustrato seco [*W/mK*].

Densidad: densidad del sustrato [kg/m^3].

Calor específico: calor específico del sustrato [J/kgK].

Coefficiente de absorción térmica: fracción de la longitud de onda larga incidente que es absorbida por el sustrato.

Coefficiente absorción solar: fracción de la radiación solar incidente que es absorbida por el sustrato.

Coefficiente absorción visible: fracción de radiación visible absorbida por el sustrato.

Una vez definido el material “Ecoroof”, el usuario puede aplicarlo como la capa más externa en cualquier elemento de cubierta.

El modelo se validó a través de los datos obtenidos de una monitorización de un año de duración de una cubierta verde instalada en un edificio de la Universidad Central de Florida (UCF).

Los resultados demuestran que el modelo reproduce el comportamiento de las variaciones de temperatura cerca de la superficie del suelo.

Se realizaron además análisis de sensibilidad del para explorar su respuesta a las variaciones en los parámetros de entrada.

En todos los casos, existía una correlación entre los resultados y las variaciones de parámetros. Por ejemplo, una capa de sustrato más alta conducía a un aumento del aislamiento, reduciendo la demanda de calefacción y refrigeración, con ahorros mayores para calefacción en ciudades con climas fríos.

Tal y como se preveía, el aumento en la densidad de vegetación tuvo por resultado una reducción en el uso de electricidad para refrigeración en

verano y el consecuente aumento de la misma para calefacción en invierno. El aumento de riego en verano también tuvo los resultados esperados, siendo aún más beneficioso en climas menos húmedos.

En conclusión, el modelo estudiado representa un avance significativo en la investigación de las implicaciones energéticas ligadas a la instalación de cubiertas verdes en edificios, permitiendo estimar cuantitativamente el potencial de ahorro energético debido a una cubierta de estas características.

Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs

Chi Feng, Qinglin Meng, Yufeng Zhang

Energy and Buildings, 2010

Este trabajo se centra en el balance térmico de las cubiertas ecológicas, analiza las vías de salida y entrada de energía. Para ello, se desarrolla un modelo matemático simplificado basado en la siguientes premisas:

- a:** la vegetación con un porcentaje de cobertura del 100 % se considera como un cuerpo gris;
- b:** los efectos térmicos de microorganismos y del metabolismo de las plantas se consideran despreciables, a excepción de los relativos a la fotosíntesis, respiración y transpiración;
- c:** las condiciones de precipitación y rocío son despreciables;
- d:** la cubierta verde es lo suficientemente grande como para asumir su homogeneidad horizontal y desarrollar un análisis unidimensional.

Considerando las plantas y sustrato como sistema y, el aire y el forjado estructural como ambiente exterior, la figura 3.5 describe los intercambios de energía entre el sistema y el medio ambiente.

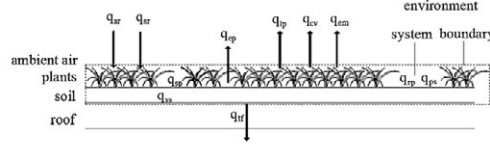


Figura 3.5: Energy exchange between an extensive green roof and its environment.

De acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica, se obtiene el siguiente balance de energía.

$$q_{sr} + q_{lr} + q_{cv} + q_{em} + q_{tp} + q_{ep} + q_{sp} + q_{ss} + q_{tf} + q_{ps} + q_{rp} = 0 \quad (3.4)$$

Donde:

q_{sr} : ganancia de calor debida a la radiación solar [Wm^{-2}];

q_{lr} : ganancia de calor debida a la radiación de onda larga [Wm^{-2}];

q_{cv} : calor transferido por convección [Wm^{-2}];

q_{em} : pérdida de calor por emisión [Wm^{-2}];

q_{tp} : pérdida de calor por transpiración [Wm^{-2}];

q_{ep} : pérdida de calor por evaporación [Wm^{-2}];

q_{sp} : calor almacenado por la vegetación [Wm^{-2}];

q_{ss} : calor almacenado por el sustrato [Wm^{-2}];

q_{tf} : calor transferido al ambiente interior [Wm^{-2}];

q_{ps} : energía utilizada en la fotosíntesis [Wm^{-2}];

q_{rp} : calor generado por la respiración [Wm^{-2}].

Desarrollando todos los términos de la ecuación (3.4), e integrando en un intervalo de tiempo $\Delta\tau$, se llega a la ecuación (3.5) que representa el balance térmico simplificado de una cubierta verde. Esta ecuación se puede utilizar para el cálculo instantáneo, es decir cuando $\Delta\tau$ tiende a cero.

$$\begin{aligned}
 & \alpha_s \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} q_{sri} d\tau + \alpha_l \sigma \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (t_a + 273, 15)^4 (0, 802 + 0, 004 t_a) d\tau \\
 & + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (5, 7 + 3, 8 v) (t_p - t_a) d\tau + \sigma \varepsilon \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} (t_p + 273, 15)^4 d\tau \\
 & + l \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} R_e t d\tau + \rho_p \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} c_p dt_p + \rho_s \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} c_s dt_s \\
 & + \int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} q_{tf} d\tau + \frac{\int_{\tau}^{\tau+\Delta\tau} q_{sri}(\tau) d\tau}{\int_0^{24h} q_{sri}(\tau) d\tau} \frac{6, 5}{TC(1 + (R_{ep}/R_{tp}))} l \int_0^{24h} R_{et} d\tau = 0
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

Donde:

l : calor latente de evaporación [$Jkg^{-1}K^{-1}$];

σ : constante de Stefan-Boltzmann [$Wm^{-2}K^{-4}$];

α_l : absorptividad de onda larga de la vegetación;

α_s : absorptividad de onda corta de la vegetación;

ε : emisividad de la vegetación;

ρ_p : densidad superficial de la vegetación [kgm^{-2}];

ρ_s : densidad superficial del sustrato [kgm^{-2}];

c_p : calor específico de la vegetación [$Jkg^{-1}K^{-1}$];

c_s : calor específico del sustrato [$Jkg^{-1}K^{-1}$];

TC : coeficiente de transpiración;

R_{ep} : velocidad de evaporación [$kgm^{-2}s^{-1}$];

R_{tp} : velocidad de evapotranspiración [$kgm^{-2}s^{-1}$];

R_{et} : velocidad de transpiración [$kgm^{-2}s^{-1}$];

t_a : temperatura del aire [K];

t_d : temperatura del rocío [K];

t_p : temperatura de la vegetación [K];

t_s : temperatura del sustrato [K];

v : velocidad del viento encima de la vegetación [ms^{-1}].

Hay 19 parámetros en la ecuación (3.5), siendo constantes conocidas l y σ . Respecto de los parámetros α_s , α_l , ε , ρ_p , ρ_s , c_p , c_s , TC y R_{ep}/R_{tp} dependen de las condiciones reales; así que sólo se necesitan medir q_{sri} , q_{tf} , t_a , t_d , t_p , t_s , v , y R_{et} .

Para validar el modelo descrito, se llevó a cabo una experimentación en una cubierta verde extensiva de *sedum lineare*, instalada en un edificio de la Universidad de Tecnología de Guangzhou, en el sur de China. Se tomaron y

analizaron datos experimentales durante 11 días, desde 11 julio 2009 hasta 21 julio 2009.

El sustrato era de 4 cm de espesor, con una densidad en seco de 19.5 kgm^{-2} . El calor específico del sustrato se calculó considerando el calor específico del sustrato seco, el contenido de agua del suelo y las raíces de las plantas. El calor específico de las plantas se consideró igual al del agua, al ser el *sedum lineare* una planta suculenta. Se consideró una cobertura del 100 %, un LAI de 4,6 y una altura de plantas de 7 cm.

El coeficiente de absorción de onda corta se calculó midiendo con dos radiómetros la radiación solar reflejada y la radiación solar incidente simultáneamente, siendo el valor 0,83. El coeficiente de absorción de onda larga del césped no se obtuvo del experimento, así que se tomó el valor 0,1 en base a estudios anteriores.

De acuerdo con la ley de Kirchhoff, la emisividad de un cuerpo gris difuso es igual a su coeficiente de absorción, tomándose 1 por valor. Al desconocer el coeficiente de transpiración de la planta, se tomó igual a 20. La relación entre la velocidad de evaporación y la velocidad de transpiración igual a 1.

Los parámetros meteorológicos se registraron durante todo el período experimental.

La temperatura de las hojas se midió a través de termopares, que se mantuvieron en estrecho contacto con las hojas para evitar la exposición directa a la radiación solar. El flujo de calor entrante se midió con un medidor de flujo en la superficie interior de la cubierta del edificio. El aire interior se mantuvo en torno a 26°C por un sistema de aire acondicionado. Todos los datos se tomaron por segundo, registrando el valor medio por minuto.

Cuadro 3.1: Flujos de energía diarios y balance energético de la cubierta vegetal.

Término		Flujos de energía [MJm ⁻²]	Porcentaje %
Ganancias	Radiación solar	15,72	99,1
	Convección	0,15	0,9
	Total	15,87	100
Pérdidas	Evapotranspiración	-8,80	58,4
	Onda larga	-4,65	30,9
	Intercambio radiante		
	Fotosíntesis	-1,43	9,5
	Transferido al substrato	-0,09	0,6
	Almacenado en el substrato	-0,07	0,5
	Almacenado en las plantas	-0,02	0,1
	Total	-15,06	100

Como se puede observar en la tabla 3.1, las ganancias y las pérdidas de calor de un día típico de verano, incluyendo el almacenamiento, fueron casi las mismas, con una desviación relativa del 5 %. Ésto indica que el modelo de balance energético propuesto es de gran precisión. Los datos evidencian que, la radiación solar domina el balance energético de la cubierta verde para un día típico de verano cuando el suelo es rico en contenido de agua. Por otro lado, la pérdida de calor a través de la evapotranspiración representa el 58,4 %, jugando el papel más importante de todos. Otros elementos destacables son el intercambio radiativo de onda larga (30.9 %) y la energía utilizada para la fotosíntesis (9,5 %).

Green roof energy and water related performance in Mediterranean climate

R. Fioretti, A. Palla, L.G. Lanza, P. Principi

Building and Environment, 2010

Esta investigación se llevó a cabo en dos ciudades italianas, Ancona, en el centro del país y Genova, en el norte.

En 2007 el gobierno regional de “Las Marcas” (Italia) y el Departamento de Energía de la Universidad Politécnica de Las Marcas establecieron un programa de colaboración para investigar el comportamiento energético de una cubierta verde instalada en uno de los edificios del gobierno regional. La cubierta verde, con una superficie total de aproximadamente 3800 m², se encuentra en Ancona, una ciudad costera del centro de Italia.

El análisis térmico se realizó en verano, al ser más eficaz en esta temporada el rendimiento de la cubierta verde para el área Mediterránea. Hace algunos años una pequeña parte de la superficie de la azotea del edificio, en principio diseñada y construida como cubierta verde intensiva, fue modificada bajo las indicaciones de los investigadores de la Universidad Politécnica de Las Marcas con el objetivo de adoptar una solución técnica capaz de aumentar el rendimiento energético de la cubierta mediante el uso de un sustrato adecuado y de plantas autóctonas.

Durante el período de monitorización de aproximadamente un año de duración, se registraron datos relativos a la mayoría de los parámetros externos e internos del edificio. Posteriormente, se compararon los datos obtenidos del seguimiento simultáneo de dos zonas de la cubierta: una zona con cubierta verde extensiva y otra, con una solución de cubierta convencional. En ambos casos, el forjado era idéntico, compuesto por hormigón, una capa de poliestireno y una membrana impermeabilizante.

La azotea del laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Génova (Italia) era un techo plano, con una superficie total de aproxima-

mente 1000 m². Génova es una ciudad costera situada en el noroeste de Italia en el Mar de Liguria. De la cubierta verde que se construyó en 1969, una superficie equivalente a 350 m² se sustituyó en 2007 por otra solución constructiva constituida por una capa de protección, 15 cm de capa de drenaje (realizado con lapillus), capa de fieltro y de substrato de 20 cm de espesor (lapillus, zeolita, piedra pómez, y turba). Esta superficie de cubierta, a su vez, se dividía en dos zonas diferenciadas por la composición de substrato: una primera zona con 70 % lapillus, 30 % de piedra pómez y turba; y otra con 70 % lapillus, 20 % de piedra pómez, 10 % de zeolita y turba. El lugar de estudio estaba equipado con una estación meteorológica y un dispositivo hidráulico para la supervisión continua del flujo de agua en el subsuelo.

La eficiencia energética de la cubierta verde del edificio del Consejo Regional de Las Marcas se analizó mediante la comparación de los valores de cada parámetro registrados en las diferentes estaciones del año en las dos zonas de la cubierta. En primer lugar, la reducción de la radiación solar debida a la vegetación se evaluó comparando la radiación solar global medida en la superficie horizontal con la radiación solar medida debajo de las hojas. La radiación se reduce aproximadamente en un 90 %. A continuación, se comparó temperatura de bulbo seco del aire exterior con los valores de temperatura medidos debajo de las hojas y en el suelo. Cotejando la temperatura exterior de la cubierta convencional, con las temperaturas registradas en las capas superiores de la cubierta vegetal, se observó cómo las temperaturas de la cubierta verde eran notablemente más bajas. las temperaturas son bastante más bajas. Considerando las temperaturas medias mensuales durante los meses de verano (junio-septiembre), se detectó cómo la temperatura medida

debajo de las hojas era en media de 1 °C inferior a la temperatura del aire y de 5 °C -6 °C inferior a la temperatura medida en la superficie de la cubierta convencional. Para evaluar el efecto de la cubierta verde en las condiciones del ambiente interior, se estudió el flujo de calor a través de las dos cubiertas. Analizando los datos, se observó una reducción considerable en las fluctuaciones del flujo y, en consecuencia, una reducción de los picos positivos y negativos.

En el sitio experimental de la Universidad de Génova, la monitorización de la cubierta vegetal empezó en mayo de 2007, siguiendo aún en desarrollo. A partir de los datos analizados en el momento de la publicación del trabajo, se puede concluir que la cubierta verde funciona como dispositivo para el control del agua de lluvia con un volumen promedio retenido y una reducción en el pico respectivamente iguales a $68 \pm 37\%$ y $89 \pm 15\%$, respectivamente.

Por tanto, la cubierta verde es capaz de reducir significativamente la generación de escorrentía de aguas pluviales en la región mediterránea en términos de reducción del volumen de escorrentía y de atenuación del pico. Extrapolar estos resultados a la escala urbana permitiría de evaluar el papel que la instalación de cubiertas vegetales podría tener en la prevención de inundaciones en áreas urbanas.

Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs

G. Kotsiris, A. Androutsopoulosb, E. Polychronib, P.A. Nektariosa
Energy and buildings, 2012

Los objetivos del presente estudio son:

- a** :determinar el coeficiente de transmisión térmica dinámico;
- b** :comparar los coeficientes de transmisión térmica de cada uno de los sistemas analizados con un sistema de cubierta convencional y con un sistema muy aislado;
- c** :investigar la relación entre el valor de U estimado y el contenido de humedad del sustrato;
- d** :cuantificar el ahorro de energía en un edificio residencial de un piso mediante el uso de software TRNSYS.

Para el experimento, se utilizaron cinco sistemas diferentes de cubierta vegetal, iguales en cuanto a la solución constructiva, pero diferenciados por cinco tipos de sustratos. Cada sistema se instaló sobre una losa de 12 cm de hormigón colocada en la parte superior de la celda de ensayo. Sobre la losa se dispusieron múltiples capas, idénticas excepto para el drenaje y la capa de sustrato. Los cinco sustratos se eligieron en base a estudios preliminares sobre los materiales locales adaptados a una cubierta vegetal:

- 1** : 8 cm de lana de roca hidrófila con una densidad de 150 kgm^{-3} con *Festuca arundinacea* de 2 cm de altura;
- 2** : 8 cm de suelo arenoso mezclado con perlita y zeolita en proporciones volumétricas que son indicados por sus subíndices ($S_{30} : Per_{65} : Z_5$) con *Festuca arundinacea* de 2 cm de altura;
- 3** : 8 cm de piedra pómez mezclada con turba y zeolita ($Pum_{65} : P_{30} : Z_5$) con *Festuca arundinacea* de 2 cm de altura;

4 : 20 cm de piedra pómez mezclada con turba y zeolita ($P_{um65} : P_{30} : Z_5$) con *Lavandula angustifolia*;

5 : 20 cm de suelo arenoso mezclado con perlita y plantado con *L. angustifolia*.

El valor U se determinó según un método de análisis PASLINK, específico para celdas al aire libre. Este método emplea un módulo pseudo-adiabático que tiende a eliminar todas las pérdidas de calor en todos los lados menos el que está siendo objeto de ensayo, en este caso el techo. El procedimiento es válido para una amplia gama de componentes de construcción y consiste en desarrollar diferentes pruebas térmicas en muy diversas condiciones climáticas. Para el cálculo del valor de U se usó el software LORD, ampliamente utilizado para modelar sistemas térmicos, tales como paredes, ventanas y habitaciones completas, así como, sistemas más complejos como pueden ser las cubiertas verdes.

Las cubiertas se ensayaron una tras otra en un módulo PASLINK: una habitación muy aislada de dimensiones 8.4 m, 3.8 m, 3.6 m. En cada caso, se hicieron las mediciones necesarias para la estimación del valor de transmitancia térmica de la cubierta. El módulo se instala en un entorno al aire libre y cualquier cerramiento o componente del edificio puede ser ensayado en condiciones meteorológicas reales colocando el componente en el módulo. El módulo de estudio se dividía en dos partes: la sala de ensayo (2.75 m x 2.75 m x 5 m y una sala de servicio que contenía los equipos auxiliares necesarios para la prueba. El módulo era transportable y, en este caso, se colocó en el Centro de Energías Renovables en Pikermi, cerca de Atenas,

Grecia. Las características más importantes del módulo de ensayo eran las condiciones térmicas controladas en toda la sala de prueba y el aislamiento térmico de su envolvente, que reducía al mínimo las pérdidas de calor en todas las superficies de la sala, exceptuando aquella en la que se había instalado el componente de prueba.

El estudio se llevó a cabo en tres fases:

Fase 1: se obtuvieron datos sobre las propiedades térmicas de los diferentes sustratos.

Fase 2: se utilizó el programa LORD para la estimación del valor de transmitancia. El flujo de calor hacia y desde la sala de ensayo (excepto el techo) era prácticamente nulo, siendo el módulo adiabático y las diferencias de temperatura entre la sala de ensayo y la sala de control entre -0.15°C y 0.10°C .

Los datos de entrada empleados en el análisis fueron los siguientes:

Ttr: temperatura del aire interior de la sala de ensayos (promedio de 7 sensores);

Tsr: temperatura del aire interior de la sala de control.

Texsur: temperatura de la superficie externa de la sala de ensayo (promedio de 27 sensores);

Tinsur: temperatura de la superficie interior de la sala de ensayo (media de los 27 sensores);

Tamb: temperatura del aire exterior;

QHE: potencia calorífica total suministrada a la habitación;

Hflux: flujo de calor a través de la cubierta verde;

GIHRad: radiación solar global en el plano horizontal.

Fase 3: los valores de U, determinados en la fase anterior, se utilizaron como datos de entrada en el programa TRNSYS, para la simulación de un edificio de viviendas, con el fin de calcular el ahorro de energía debido a la instalación de la cubierta verde. El modelo utilizado se basó en una construcción convencional sin aislamiento térmico en paredes y techo, vidrios individuales con marco de aluminio y ningún dispositivo de sombreado. El edificio se simuló con dos tipos de cubiertas diferentes: la primera era un techo sin aislamiento y, la segunda, un techo con aislamiento de acuerdo con los requerimientos de la normativa griega (transmitancia inferior a $0.45 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ para la zona climática B).

En total se simularon doce escenarios:

- 1: cubierta convencional sin aislamiento;
- 2: cubierta con aislamiento marcado por normativa (U menor o igual a $0.45 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$);
- 3: cubierta verde con 8 cm de espesor de lana de roca y 2 cm de *Festuca arundinacea*;
- 4: cubierta verde con 8 cm de sustrato de mezcla de perlita y 2 cm de *Festuca arundinacea*;
- 5: cubierta verde con 8 cm de sustrato de mezcla de perlita y 2 cm de *Festuca arundinacea*;

- 6: cubierta verde con 20 cm de sustrato con mezcla de piedra pómez completamente cubierto de lavanda;
- 7: cubierta verde con 20 cm de sustrato con mezcla de perlita completamente cubierto de lavanda;
- 8: cubierta con aislamiento marcado por normativa, una capa de sustrato de 8 cm de espesor de lana de roca y 2 cm *Festuca arundinacea*;
- 9: cubierta con aislamiento marcado por normativa, una capa de sustrato de 8 cm de espesor con mezcla de perlita y 2 cm de *Festuca arundinacea*;
- 10: cubierta con aislamiento marcado por normativa, una capa de sustrato de 8 cm de espesor con mezcla de piedra pómez Y 2 cm de *Festuca arundinacea*;
- 11: cubierta con aislamiento marcado por normativa y una capa de sustrato de 20 cm de espesor con mezcla de piedra pómez completamente cubierto de lavanda;
- 12: cubierta con aislamiento marcado por normativa, una capa de sustrato de 20 cm de espesor con mezcla de perlita completamente cubierto de lavanda;

Las temperaturas mantenidas en el interior fueron 20 °C y 26 °C para invierno y verano, respectivamente. Para cada cubierta analizada, el coeficiente de absortividad de las superficies exteriores se determinó a través de mediciones puntuales y el coeficiente de evapotranspiración se estimó en base a estudios anteriores.

Los coeficientes globales de transmitancia térmica derivados de los ensayos y del método del test de PASLINK, así como los valores correspondientes a dos cubiertas convencionales se resumen en la figura 3.6.

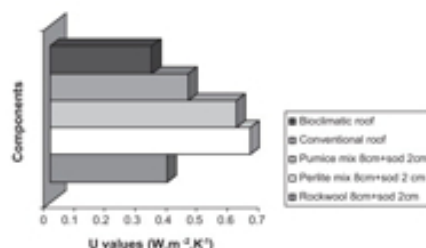


Figura 3.6: Comparison of three estimated U-values for 10 cm deep substrates with the same levels of moisture content with the U-values of a conventional and an advanced insulated roof.

La cubierta bioclimática era la cubierta del edificio bioclimático CRES, constituida por 5 cm de poliestireno extruido y situada en próximo al módulo de ensayo. Del mismo modo, la cubierta convencional estaba formada por una losa con aislamiento típico de 17 cm de espesor a base de una mezcla de perlita y cemento, cumpliendo con las restricciones de la normativa griega. ($U_{max} < 0.45 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$).

La cubierta verde con sustrato de lana de roca tenía un valor de transmitancia térmica bajo, parecido al del techo del edificio bioclimático. Por otro lado, el techo con 10 cm de sustrato de perlita y piedra pómez tenía una transmitancia por encima del límite establecido por la normativa griega. Para mejorar este valor fue necesario aumentar el espesor del sustrato. El buen comportamiento térmico de la cubierta con el sustrato de lana de roca, incluso para espesores pequeños, se puede explicar gracias a su mayor porosidad,

Cuadro 3.2: Comparación entre los valores de transmitancia térmica calculados con TRNSYS y obtenidos con el método de PASLINK.

Cubierta verde equipada con	Transmitancia térmica [$Wm^{-2}K^{-1}$]		Diferencia [%]
	PASLINK	TRNSYS	
Lana de roca 10 cm	0,38	0,531	39,5
Perlite 10 cm	0,651	0,830	27,5
Piedra pómez 10 cm	0,606	0,808	33,3
Perlite 20 cm	0,393	0,513	30,5
Piedra pómez 20 cm	0,414	0,542	31

un 80 %. Ésto se debe a que la lana de roca presenta retenciones de humedad del 30-40 % de su volumen al estar éste en su mayor parte ocupado por aire y, por tanto, reduciéndose el valor del coeficiente de transmisión térmica.

Los coeficientes de transmisión térmica obtenidos con el método de PASLINK se compararon con los valores obtenidos, utilizando los valores de conductividad térmica de la biblioteca del programa TRNSYS. Los resultados se presentan en la tabla 3.2.

Estos datos demuestran que el enfoque teórico conduce a sobrestimar los valores de transmitancia térmica de un 30-40 %, ya que el substrato se considera como un elemento cualquiera de la construcción.

Si el riego es el adecuado, la lana de roca parece ser un material ideal para las cubiertas verdes, ya que proporciona un buen crecimiento a las plantas y tiene altas prestaciones térmicas. Además, el ahorro de agua debido a las bajas necesidades de riego de este sistema constituye un factor importante para el clima mediterráneo.

Cómo última etapa de la investigación, se llevaron a cabo simulaciones para determinar las demandas energéticas de calefacción y refrigeración pa-

ra cada uno de los escenarios. Los resultados demuestran que las cubiertas verdes garantizan un ahorro energético para calefacción que varía entre el 21,1 % y el 28,4 % en comparación con una cubierta sin aislamiento. Sin embargo, respecto de una cubierta bien aislada sólo la cubierta con substrato de lana de roca mostró un mejor funcionamiento térmico. Además, debido a la evapotranspiración, todas las cubiertas verdes garantizaban un alto ahorro de energía para refrigeración (60,5-62,5 %), en comparación con una cubierta no aislada y, en porcentajes menores, con una cubierta aislada.

Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes

E.A. Eumorfopoulou, K.J. Kontoleon

Building and environment, 2009

Con el fin de determinar la influencia de las plantas en el rendimiento térmico de un cerramiento, se llevó a cabo un estudio comparativo de dos fachadas en condiciones equivalentes, una con vegetación y otra sin vegetación. La respuesta térmica de ambos cerramientos se analizó a través de un método estacionario. El edificio objeto de estudio, situado en Grecia, contaba con cinco plantas, de las cuales, las plantas baja, primera y segunda estaban cubiertas con vegetación. La investigación se centró en la fachada este, ya que las condiciones relativas a esta orientación eran las más desfavorables; tanto por recibir radiación solar directa durante la mañana y estar expuesta a una alta intensidad de radiación solar durante el verano.

El análisis térmico se centró en las plantas segunda y tercera, de características similares. La totalidad de la fachada de la segunda planta del

edificio, excluyendo las ventanas, estaba cubierta de plantas trepadoras (*parthenocissus tricuspidata*). El porcentaje y la colocación de acristalamiento en ambas plantas eran idénticos; por tanto, el flujo de calor a través de ellos era aproximadamente el mismo. La fachada estaba constituida por un cerramiento de ladrillos aislantes de 20 cm de espesor y una conductividad térmica de $0.87 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ revestidos con yeso de color claro en ambos lados (interior y exterior). El uso de un yeso de estas características para superficies expuestas a radiación solar directa es necesario en el caso de la región griega para el periodo de verano, ya que evita el sobrecalentamiento de las mismas. Por otro lado, lo más idóneo en el período de invierno es el uso de un yeso de color oscuro por los beneficios asociados al aumento de calor almacenado en las paredes. En consecuencia, la opción más eficaz es emplear plantas de hoja caduca sobre una superficie de fachada de color oscuro. Con el fin de evaluar la influencia de las plantas trepadoras en el comportamiento térmico de las paredes, se instaló un sistema de medición para registrar las temperaturas exteriores e interiores, así como, las temperaturas superficiales de las paredes. (Figura 3.9).

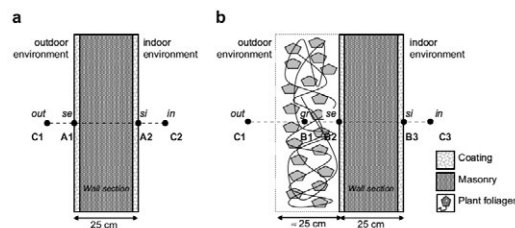


Figura 3.7: Characteristic sections of (a) a bare and (b) a plant-covered wall surface defining the position of the sensors.

Tras un análisis pormenorizado de los datos registrados en las mediciones,

los resultados obtenidos ponían de manifiesto la mayor eficacia de las fachadas vegetales frente a aquellas directamente expuestas a la radiación solar. Las fachadas cubiertas de vegetación parecen ser adecuadas para edificios situados en zonas urbanas muy pobladas de la región Mediterránea. Su utilización puede ser considerada como una solución que mejora las condiciones térmicas interiores. Los resultados también demostraron que las temperaturas mínimas y máximas de las superficies cubiertas de plantas eran considerablemente inferiores a las temperaturas superficiales de la otra fachada. De este modo, la influencia de las plantas trepadoras era más notable en los días más calurosos. Además, los ciclos de temperatura diurnos en la superficie con vegetación presentaban una mayor atenuación a diferencia de la superficie sin vegetación. Esta solución de fachada con vegetación puede instalarse en edificios existentes, mejorando el acondicionamiento pasivo del edificio y, por tanto, reduciendo el uso de sistemas de refrigeración.

Energy simulation of vertical greenery systems

N.H. Wong, A.Y. Kwang Tan, P.Y. Tan, N.C. Wong

Energy and Buildings, 2009

El objetivo de esta investigación era simular los efectos de los sistemas de vegetación vertical, relativos a temperatura y consumo energético en edificios. A través del programa de simulación TAS, se realizó un estudio comparativo de tres escenarios diferentes, tal y como se muestra en la figura 3.8. El edificio objeto de estudio en todos los casos era un modelo hipotético de 10 plantas, con unas dimensiones en planta de 30 m de longitud por 30 m de anchura y una altura de forjado de 4 m. Se tomaron por parámetros de evaluación la

temperatura media radiante al interior (MRT) medida en la altura media (correspondiente al quinto nivel) y las cargas de refrigeración en todo el edificio. La temperatura media radiante se obtuvo en 5 lugares, a partir de 0.2 m del centro de cada pared y en el punto medio del edificio.

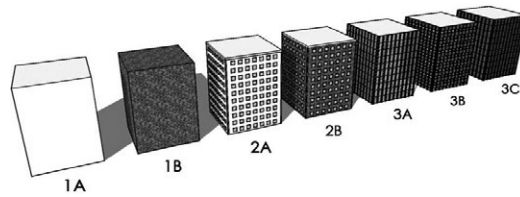


Figura 3.8: Scenario 1 (left), 2 (center) and 3 (right) of TAS simulations.

Los escenarios 1A y 1B corresponden al edificio hipotético de fachadas completamente opacas, con una cobertura de vegetación del 0 % y 100 %, respectivamente. Los escenarios 2A y 2B eran similares a los anteriores, salvo por las 7 ventanas incluidas en cada fachada y el nivel . Cada ventana mide 2 m por 2 m, se distribuyen uniformemente sin ser cubiertas por los sistemas verticales de vegetación. Los escenarios 3A, 3B y 3C corresponden al edificio hipotético con vidrio transparente de 6 mm de espesor en la totalidad de la fachada con un coeficiente de sombreado de 0.7 y una cobertura de vegetación variable según el tipo de escenario (0 %, 50 % y 100 %, respectivamente). Además, los coeficientes de sombreado de los sistemas verticales de vegetación para los escenarios 3B, 3C (i) y 3C (ii) son 0.1, 0.5 y 0.1 respectivamente.

Las condiciones meteorológicas tomadas corresponden a Singapur en 2001. No se aplicó ningún sistema de refrigeración con el fin de determinar exactamente los efectos de los sistemas verticales de vegetación en la temperatura

media radiante y en la carga de refrigeración. En el escenario de simulación de la temperatura media radiante, se considera que cada ventana se abre y existe ventilación natural. Sin embargo, para la simulación de la carga de refrigeración, el edificio se simula bajo condiciones de aire acondicionado en función de un horario convencional de trabajo (de lunes a viernes, de 09:00 h a 18:00 h) con una temperatura del termostato de 24 °C durante todo un año. En el escenario 2 las ventanas permanecen cerradas; mientras que en el escenario 3, se abren de 6:00 h a 9:00 h para reducir la acumulación de calor debido al efecto invernadero.

En el escenario 1B, la presencia de sistemas verticales de vegetación ayuda a reducir la temperatura media radiante de manera significativa, con un máximo de 24.01 °C frente a 34.39 °C del escenario 1A. Además, la temperatura media radiante en el escenario 1B no fluctúa. La razón más probable de tan alta reducción en la temperatura media radiante puede ser la ausencia de ventanas en el edificio. La presencia de vegetación supone un aumento de aislamiento térmico en el edificio, ya que, la pérdida de calor se produce principalmente por conducción. En el escenario 2b, la presencia de vegetación no reduce la temperatura radiante media en gran medida. Las máximas temperaturas medias radiantes en los escenarios 2A y 2B son 36.57 °C y 35.30 °C respectivamente. Los sistemas verticales de vegetación sólo cubren la pared opaca y aumentan el valor de resistencia térmica de la pared, reduciendo la transferencia de calor por conducción a través de ésta. Sin embargo, en este caso, la principal fuente de ganancia térmica se debe a la transferencia de calor por radiación a través de las ventanas.

Las máximas temperaturas medias radiantes en los escenarios 3B y 3C

(i) son 45.81 °C y 45.03 °C, respectivamente. Comparando los escenarios 3A, 3B y 3C (i), se observa cómo la presencia de sistemas verticales de vegetación disminuye los valores medios de temperatura radiante. Respecto a los escenarios 1A y 1B, la reducción de cargas de refrigeración detectada se debe a la notable disminución de los valores medios de temperatura radiante. Por lo tanto, los sistemas verticales de vegetación juegan un papel importante en el aumento del valor de resistencia térmica, minimizando la transferencia de calor por conducción y reduciendo considerablemente el consumo de energía de refrigeración. En el escenario 2B, sólo se reduce en un 10 % la carga de refrigeración en comparación con el escenario 2A; ya que la radiación solar penetra en el edificio a través de las ventanas sin sombrear. Por lo tanto, se puede deducir que es necesario un sistema de protección contra la radiación solar directa, a fin de reducir significativamente las cargas de refrigeración. En el escenario 3C (i), caracterizado por un 100 % de cobertura de vegetación y el coeficiente de sombra más alto, se obtiene una reducción del 17,93 % de las cargas de refrigeración. Este valor es más alto que el 12,45 % obtenido en el escenario 3B con un 50 % de cobertura. Sin embargo, el escenario 3C (ii), con un 100 % de cobertura de vegetación y un bajo coeficiente de sombra de 0,1, consigue un 31,75 % de reducción en energía de refrigeración.

Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls

N.H. Wong , A.Y. Kwang Tan, Y. Chen, K. Sekar, P.Y. Tan, D. Chan, K. Chiang, N.C. Wong

Buildings and environment, 2010

En Singapur, los sistemas verticales de vegetación se encuentran todavía en su primera etapa de desarrollo. Sin embargo, el gobierno de Singapur está desarrollando políticas innovadoras para integrar las zonas verdes en las superficies construidas de las ciudades, resultando prometedor el futuro de este tipo de sistemas.

Varios edificios en Singapur integran superficies vegetales en fachada. Los resultados de los estudios realizados hasta el momento, demuestran que la diferencia de temperatura entre las superficies con y sin vegetación puede llegar a ser de 11 °C, lo que demuestra el potencial de las fachadas vegetales en la mejora de las condiciones térmicas de los rascacielos.

Con el fin de promover el desarrollo de este tipo de sistemas vegetales y el estudio de su funcionamiento en contextos tropicales, se instalaron ocho sistemas diferentes en el HortPark de Singapur. Todos ellos, incluida la pared de control, tienen las mismas dimensiones (4 m de ancho por 8 m de alto) y un soporte en hormigón de 30 cm de espesor.

Con las nueve paredes se pretendía simular las fachadas de un edificio. La superficie con plantas correspondía a la pared externa de la fachada y la pared exenta, al interior. Cabe destacar que el "interior" de la pared también se encontraba expuesto a la radiación solar y que, por tanto, las ganancias de calor podrían causar un aumento de la temperatura de la superficie "exterior" de la pared.

Por lo general, el espacio interior de un edificio está a una temperatura más baja que la temperatura exterior. Si el espacio interior cuenta con ventilación natural, entonces se darán fluctuaciones de temperatura similares a las registradas en el exterior. Por lo tanto, las temperaturas superficiales ob-

servadas en las ocho superficies exteriores, podían ser más altas de las que se registrarían en el caso de ser las fachadas exteriores de un edificio.

A pesar de esta circunstancia, este estudio experimental supone un paso fundamental previo al análisis de fachadas reales instaladas en edificios de energía cero actualmente en construcción en Singapur. Además, este estudio resulta útil a la hora de determinar las condiciones de contorno para la implementación de modelos de simulación de fachadas vegetales. Para medir las temperaturas superficiales de las 9 paredes se utilizaron 44 termopares (incluyendo la pared de control). Las temperaturas superficiales se tomaron en dos puntos, en la superficie de la fachada y en el sustrato. En la pared de control, sólo se midió la temperatura superficial.

Las mediciones de los datos climáticos se realizaron a través de 16 sensores de temperatura y humedad colocados en frente de la pared de control y de las paredes 1, 2 y 4 a una distancia de la superficie del sustrato de 0.15 m, 0.30 m, 0.60 m y 1 m, respectivamente. Para el análisis de los perfiles de temperatura se seleccionaron tres días: 24 de febrero, 28 de abril y el 21 de junio de 2008.

En la mayoría de los sistemas, la temperatura de la superficie del sustrato es más baja que la temperatura de la superficie de la pared durante la tarde y la noche, pero la tendencia cambia durante el día. Esto es debido a que la superficie del sustrato está en parte expuesta a la radiación solar durante el día, mientras que la pared se encuentra protegida por el sustrato y la vegetación. Por la noche ocurre lo contrario, el sustrato está en contacto con el aire exterior y tiende a perder calor más rápidamente que la pared; ya que esta última está protegida por sustrato y vegetación y retiene más el calor. La única excepción se observa en el sistema 2, sin sustrato, donde el efecto

de enfriamiento se debe únicamente a la sombra y a la evapotranspiración de las hojas.

En los ocho sistemas se registra una clara reducción de las temperaturas de la pared en comparación con la pared de control, aunque la reducción difiere entre los distintos sistemas. En todos los casos se registra una reducción de temperatura mayor alrededor del mediodía, cuando la temperatura exterior es más alta. En términos de reducción media, los sistemas 3 y 4 parecen ser más eficaces durante el día, llegando a unas diferencias de temperaturas de 10 °C.

En los sistemas 1, 5 y 8, se alcanza una reducción de temperatura entre 8 °C y 10 °C. En los sistemas 6 y 7, esta diferencia es ligeramente inferior, siendo alrededor de 6 °C. El sistema 2 carece de la capacidad de enfriamiento del sustrato; por este motivo la máxima diferencia de temperatura registrada respecto al sustrato es de 4.36 °C.

A partir del estudio de cada sistema, se observa cómo en todos ellos la densidad de las hojas constituye un elemento fundamental en la reducción de temperatura y cómo los cambios en el perfil de temperatura es consecuencia de la ausencia de plantas o de una reducción en la densidad de las hojas. Por tanto, el buen estado de las plantas y una adecuada densidad de las hojas son factores fundamentales para la efectividad térmica de las fachadas vegetales. A este respecto, es imprescindible una escrupulosa selección de las plantas en base al clima y al sistema de pared vegetal.

Los efectos de los muros vegetales en la temperatura ambiente dependen en gran medida del sistema. Así, el sistema 2 no ejerce efecto alguno sobre la temperatura, mientras que en el caso del sistema 4 los efectos en la reducción

de temperatura se perciben hasta a 0.6 m de distancia de la fachada. La mayor reducción de temperatura ambiente es de 3.33 °C, debida al sistema 4 y registrada a 0.15 m de distancia del muro.

Cuanto más baja sea la temperatura ambiente, más baja será la temperatura del aire de entrada de los sistemas de aire acondicionado, traduciéndose en una carga menor de refrigeración. Por tanto, la utilización de fachadas vegetales como sistemas de enfriamiento de la temperatura ambiente en entornos urbanos constituye un campo de investigación muy prometedor para la mejora de la calidad medioambiental en las ciudades del futuro.

The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone

K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou

Building and Environment, 2010

El objetivo del presente trabajo es analizar cómo la orientación y el porcentaje de cobertura de las plantas en una pared influyen en el comportamiento térmico de un edificio.

Para las cuatro orientaciones examinadas (norte, sur, este y oeste), el porcentaje de cobertura de las hojas varía de 0 % a 100 %. La investigación se llevó a cabo durante el verano en un edificio situado en el norte de Grecia, en el entorno urbano de Tesalónica. El edificio tiene una superficie cuadrada en planta de 10 m de lado y una altura de forjado de 3 m. Por lo tanto, la superficie en planta es 10 m² y su volumen 300 m³ al contar con una única planta.

La superficie vegetal, constituida por plantas de *Parthenocissus triscupi-*

data, tiene 25 cm de espesor y es lo suficientemente densa como para proteger la fachada de la radiación solar directa. La fachada del edificio consiste en una estructura multicapa de 30 cm de espesor, comprendida por: 20 cm de mampostería, 5 cm de aislante y 2.5 cm de yeso al interior y al exterior del muro con un coeficiente de absorción de 0.5 .

El edificio apoya directamente en el suelo y sus cinco envolventes están en contacto con el aire exterior. Las fachadas carecen de ventanas o de cualquier elemento exterior que produzca sombras arrojadas sobre ellas.

Además de las orientaciones y del porcentaje de cobertura de la vegetación, se estudió la influencia de la configuración de la pared al variar la posición del aislamiento. El impacto de la orientación de una fachada vegetal sobre la reducción de la carga térmica de refrigeración depende de la intensidad de la radiación solar global que recibe la fachada.

La posición del aislamiento se varió de acuerdo a las siguientes configuraciones:

En el exterior de la pared: configuración P-IM-P;

En el interior de la pared: configuración P-MI-P;

En el centro de la pared: configuración P-P-MIM.

La investigación se basó en un modelo de red térmica cuya validación se hizo con datos experimentales publicados recientemente en otro estudio. El modelo prevé varios esquemas de flujo térmico con el fin de incluir en el estudio las transferencias de calor en las hojas, la transferencia de calor a través de las capas de la envolvente del edificio y la ventilación natural.

De los resultados obtenidos, resulta obvio que el efecto de las plantas en la temperatura máxima diaria de la superficie exterior de la pared es más notable en las orientaciones este y oeste. En la orientación oeste la temperatura llega a bajar hasta 19 °C.

Por otro lado, en las orientaciones norte y sur la influencia de la vegetación es menos significativa. Además, los valores máximos de temperaturas máximas en la superficie exterior de las paredes se registran cuando el aislante está colocado en el exterior. Por lo tanto:

$$T_{se,max}IM > T_{se,max}MIM > T_{se,max}MI.$$

Por otro lado, las temperaturas medidas entre las hojas son más bajas que la temperatura del aire ambiente (aproximadamente 1 °C), debido al crecimiento y a las funciones biológicas de las plantas.

Respecto a las temperaturas interiores, no hay casi diferencia entre la pared con vegetación y la pared sin vegetación para una orientación norte (0.69 °C); mientras que la orientación oeste llega a diferencias de 3.5 °C (configuración P-MIM-P).

Para la paredes orientadas al sur y al este, la disminución de la temperatura alcanza 2.23 °C (configuración P-MI-P) y 1.15 °C (configuración P-MI-P), respectivamente.

En la mayoría de los casos, las temperaturas más bajas se registran cuando el aislamiento está colocado en la superficie externa (configuración P-IM-P), tanto para la pared sin vegetación como para la pared con vegetación. Por tanto:

$$T_{si,max}MI > T_{si,max}MIM > T_{si,max}IM.$$

La figura ?? muestra los resultados correspondientes a las temperaturas

en el interior del edificio para un 100 % de cobertura vegetal. En general, la reducción de temperatura varía de un mínimo de 0.58 °C a un máximo de 3.50 °C. Efectivamente, el efecto de la configuración de la pared es menos importante que la orientación de la fachada vegetal.

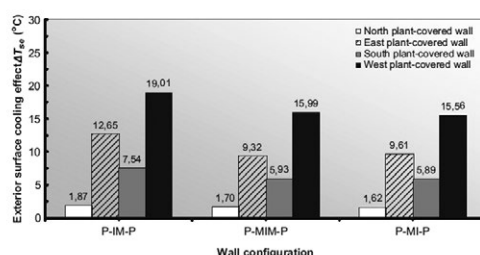


Figura 3.9: Cooling effect on the exterior surface of a plant-covered wall DT_{se} vs. type of wall configuration and orientation.

Para todas las configuraciones de pared analizadas, los valores máximos de temperatura interior disminuyen al aumentar el porcentaje de cobertura de vegetación, siendo esta disminución aproximadamente lineal.

Para el caso específico de edificios con fachada vegetal al norte, los descensos de temperatura interior son 0.22 °C, 0.26 °C, y 0.28 °C según las configuraciones P-IM-P, P-MIM-P y P-MI-P, como resultado de aumentar el porcentaje de cobertura de 0 % a 100 %.

Para fachadas vegetales con orientación sur, se obtienen descensos de 0.38 °C, 0.46 °C y 0.49 °C.

Las diferencias son mayores para los casos de fachadas con orientación este y oeste, donde se obtienen los siguientes valores: 0.83 °C, 0.96 °C y 1.04 °C para la este y 1.27 °C, 1.56 °C y 1.57 °C para la oeste.

Los resultados muestran también que las temperaturas interiores más

bajas se registran cuando el aislante está colocado en la superficie exterior. En general, para las temperaturas interiores máximas y mínimas se da la siguiente condición:

$$T_{in}MI > T_{in}MIM > T_{in}IM.$$

Para un edificio sin vegetación en fachada, la comparación entre las temperaturas máximas en las superficies interiores y la temperatura alcanzada en el interior demuestra que:

- a:** para las orientaciones norte y sur, las temperaturas superficiales son inferiores a la temperatura del aire en el interior del edificio;
- b:** para las fachadas este y oeste, las temperaturas superficiales son superiores a la temperatura del aire en el interior.

Esto es debido a que el impacto de la radiación solar es mayor en las superficies orientadas al este u oeste respecto de las norte o sur. A medida que el porcentaje de la cobertura de vegetación aumenta de 0 % a 100 %, los resultados van variando. Así, para un porcentaje de cobertura del 50 %, se demuestra que $T_{in,max} > T_{si,max}$, independientemente de la orientación de la pared cubierta de plantas, siendo T_{si} la temperatura superficial de la pared con vegetación.

Como último análisis, se estudió la demanda energética del edificio considerando un sistema de aire acondicionado desde las 8:00 h hasta las 20:00 h. Cuando el edificio no incorpora vegetación, las cargas de refrigeración son más altas al colocar el aislamiento en la superficie exterior (configuración P-IM-P). La carga media diaria es de 39.75 kWh.

Sin embargo, es importante señalar que con esta configuración de cerramiento se almacena al interior del edificio una gran cantidad de energía, sin apenas fluctuaciones de temperatura. Resultados parecidos (39 kWh) se obtienen colocando el aislamiento como capa intermedia del cerramiento (configuración P-MIM-P).

Por otra parte, al colocar el aislamiento en la superficie interior del cerramiento (configuración P-MI-P), las cargas de enfriamiento son significativamente menores (30.13 kWh); pero con grandes fluctuaciones de temperatura influidas por las fluctuaciones de temperatura externa.

Por lo tanto:

- a:** las variaciones de temperatura en la vivienda son mayores respecto a la configuración P-IM-P cuando el sistema de climatización está apagado;
- b:** el consumo de energía es menor en comparación con la configuración P-IM-P.

Cuando el edificio tiene una de sus fachadas completamente cubierta de vegetación (100 %), independientemente de la orientación, las cargas de refrigeración son más altas si el aislamiento está colocado en la superficie.

Sin embargo, los porcentajes de reducción de la demanda de energía respecto a un edificio sin vegetación varían mucho dependiendo de la orientación de la pared en la que se coloca la capa vegetal:

Fachada vegetal en orientación norte: 4,65 %

Fachada vegetal en orientación sur: 7,60 %

Fachada vegetal en orientación este: 18,17 %

Fachada vegetal en orientación oeste: 20,08 %**Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls**

C.Y. Cheng a, Ken K.S. Cheung b, L.M. Chu

Building and Environment, 2010

La presente investigación consta de dos estudios experimentales mediante los cuales se evalúa el efecto de la vegetación en el rendimiento térmico de una fachada vegetal. A diferencia de los métodos más comunes de riego por aspersión y por inundación empleados en terrenos planos, la distribución de la humedad en los sistemas verticales depende mucho más de la gravedad.

El primer estudio experimental se centró en los efectos del régimen de riego en el comportamiento de la vegetación y en el perfil vertical de distribución de humedad. En el segundo estudio, se instaló un sistema de recubrimiento vegetal en un edificio de viviendas para estudiar su potencial como sistema de protección de radiación solar. Se compararon fachadas convencionales con fachadas con paneles vegetales situadas en el edificio con la misma orientación. Los módulos utilizados, de aluminio y 1 m x 0.5 m x 0.075 m, se apilaron en tres configuraciones diferentes, utilizando 3, 4 o 5 paneles en cada una. Se instalaron en la fachada oeste para que recibieran la máxima radiación solar por la tarde.

En cada grupo de módulos, se dispuso un depósito de agua cuyas dimensiones se habían calibrado acorde a la configuración del panel.

El agua de riego se suministraba a través del panel superior dos veces al día (8:00 h y 14:00 h), actuando por gravedad (goteo) en los paneles in-

feriores. A fin de determinar el volumen diario de agua drenada, se dispuso un canalón en la parte inferior. En cada módulo se instaló un sensor para determinar la temperatura y se realizó un seguimiento fotográfico del estado de desarrollo de las plantas. El contenido de humedad en el entorno de crecimiento se midió cada día durante diez semanas, 3 h después de la irrigación de la mañana, mediante la inserción en el suelo de sensores de humedad en cuatro posiciones diferentes. Las condiciones interiores se controlaban mediante un sistema de aire acondicionado que mantenía la temperatura a 25.5 °C. En el segundo experimento, se controló el contenido de humedad, aplicando variaciones entre un 20 % y un 45 %.

Los resultados obtenidos de las monitorizaciones confirmaron la importancia del papel de la gravedad en la configuración de la distribución de la humedad en el medio de crecimiento. Cuando se compararon los niveles de humedad dentro del mismo panel, se notó una diferencia significativa entre el nivel de humedad de la parte superior y aquel de la parte inferior, siendo esta última aproximadamente el doble que la otra parte. Comparando dos configuraciones diferentes, se observó cómo el contenido de humedad sólo variaba en la parte inferior del panel. El panel superior era el más húmedo, independientemente de la configuración, y el panel situado en la parte inferior, el más seco para los grupos de 4 y 5 paneles.

El efecto de enfriamiento se expresó en términos de diferencia de temperatura entre el sustrato y el aire ambiente. Aunque la media de temperaturas registrada en el sustrato fue sólo un grado inferior a la media de temperatura del aire, la diferencia llegó a ser de 14 °C durante algunas tardes. Por otro lado, la temperatura del sustrato fue mediamente de 2 °C superior a la

temperatura del aire durante la noche.

En los días más calurosos, se observó una mayor diferencia entre la temperatura del sustrato y la temperatura del aire. Otros factores que influyeron en la temperatura fue el porcentaje de cobertura del panel y la humedad del sustrato. Con el aire acondicionado en funcionamiento, tanto la fachada convencional como la fachada vegetal registraron flujos de calor entrantes. Los flujos mayores se registraron en las fachadas sin vegetación, excepto en días nublados. En presencia de paneles con vegetación, el flujo de calor fluctuó por debajo de 10 W m^{-2} ; mientras que en las otras fachadas se registraron picos de hasta 40 W m^{-2} . Además de una atenuación del flujo de calor entrante en el edificio a través de las paredes, se registraron 4 horas de retraso en el aumento de las temperaturas en la fachada con vegetación respecto de la fachada convencional.

Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem

C.Y. Jim, Hongming He

Ecological Engineering, 2011

El objetivo principal del estudio es comprender el proceso de transmisión térmica de las fachadas vegetales con el fin de optimizar su diseño y de contribuir a crear un entorno urbano respetuoso del medio ambiente.

Los investigadores proponen un modelo de transmisión termodinámica (TTM) para simular la transmisión de calor y las variaciones de temperatura en las superficies vegetales con especial énfasis en los efectos de protección solar y sombreado. El modelo se calibra y valida a través de la comparación de observaciones empíricas.

La experimentación se llevó a cabo en la azotea de un edificio de la Universidad de Hong Kong y consistió en la monitorización de dos piezas (150 cm de longitud, 85 cm de altura y 35 cm de anchura) con recubrimiento vegetal, orientadas una al norte y otra al sur. Las piezas vegetales estaban compuestas por un contenedor plástico con 70 plantas herbáceas dispuestas en 7 filas con 10 plantas por hilera y un sistema de riego por goteo para el suministro adicional de agua.

Los datos microclimáticos, la radiación solar y las condiciones del suelo se registraron automáticamente e intervalos de 15 min. El flujo de calor se monitorizó a través de un sensor específico. La humedad y la temperatura del suelo se midieron en diferentes puntos del sustrato; y las temperaturas superficiales, mediante un radiómetro de infrarrojos. Seis superficies fueron monitorizadas de forma continua: las superficies vegetales orientadas al norte y al sur; los muros de hormigón en la parte posterior y los muros de hormigón empleados como fachadas testigo con orientación norte y sur. Los datos meteorológicos se tomaron a partir de una estación meteorológica próxima a las fachadas vegetales.

El modelo propuesto se evaluó a través del método del error cuadrático medio (*RMSE Root mean square error*) y del método del coeficiente de Nash–Sutcliffe (*NSEC Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient*).

Los modelos resultaron ser muy eficaces, estando los valores estimados en consonancia con los valores observados. Los resultados del modelo predictivo de las temperaturas muestran valores de RMSE más bajos (2.79-9.71) respecto al modelo predictivo del flujo de calor (19.17 a 90.78).

Los valores de NSEC son relativamente altos (0.54-0.87) y sólo el 9 %

entra dentro del rango (0.56-0.69). Estos resultados indican que el modelo estima la transmisión de calor con un error aceptable.

La radiación solar global es 0 sobre las 6:00-8:00 h hasta llegar a valores máximos sobre las 12:00-13:00 h, para luego disminuir a 0 alrededor de las 18:00-20:00 h.

El suelo se empieza a calentar sobre las 6:00 h y la temperatura máxima se alcanza sobre las 12:00 h.

El flujo de calor a través del elemento vegetal varía con las fluctuaciones de la radiación solar, algunas variaciones dependen del ritmo de las precipitaciones monzónicas. Las tendencias estacionales se ven también afectadas por la lluvia y la nubosidad. La radiación solar global es más baja en invierno, sobre todo en los meses de enero y febrero, alcanzando el valor máximo en verano durante julio y agosto (1168 W m^{-2} de radiación solar global y 889 W m^{-2} de radiación solar directa).

Los resultados muestran que el efecto de sombreado de la vegetación es relevante, especialmente durante los períodos en los que se registran temperaturas altas durante el día. Resulta evidente que las fachadas vegetales reducen más significativamente el flujo de calor y la temperatura que las paredes testigo. Por ejemplo, cuando la radiación solar global y la temperatura de la pared testigo sur alcanzan valores máximos (1168 W m^{-2} , 48.48°C), la pared verde orientada al sur registra valores mucho más bajos (586.89 W m^{-2} , 39.65°C). La diferencia de temperatura entre la superficie interior y exterior de la fachada vegetal es consecuencia del efecto del sombreado. Una de las funciones más importantes de la capa vegetal es crear una capa de aire en calma por delante de la superficie. La vegetación absorbe y almacena gran-

des cantidades de calor y es un amortiguador de las fluctuaciones diarias de temperatura. La temperatura mínima de la pared verde (7.6 °C al sur) es menor que la temperatura mínima de la pared testigo (7.9 °C). La temperatura máxima (44.5 °C al sur) también es menor que la temperatura máxima en la pared testigo (48.5 °C al sur). A las 12:00 h se registran diferencias entre las dos paredes de hasta 10 °C. Las temperaturas más bajas conllevan una reducción en las transferencias de calor a través de la fachada. Otro beneficio de la vegetación es la absorción de energía solar necesaria en los procesos fotosintéticos. Este efecto contribuye a aumentar el albedo efectivo del muro vegetal.

Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope

K. Perini, M. Ottelé, A.L.A. Fraaij, E.M. Haas, R. Raiteri

Building and Environment, 2011

El objeto de este estudio es cuantificar los posibles efectos de las envolventes vegetales verticales en la reducción de la velocidad del viento en los estratos próximos a la fachada; ya que la incorporación de estos sistemas en fachada podría propiciar la aparición de una capa de aire en reposo en el cerramiento. Además, se persigue evaluar el potencial de ahorro energético en la climatización del edificio mediante diferentes sistemas de fachada vegetal, conociendo los efectos positivos de los elementos vegetales como capa de aislamiento adicional en el cerramiento vertical. La investigación pretendía dar respuesta a las siguientes cuestiones:

- ¿Existe alguna diferencia en la reducción de la velocidad del viento

entre los diferentes sistemas de fachada vegetal?

- ¿Existe alguna diferencia entre la temperatura del aire próxima a una pared convencional y la temperatura del aire próxima a una fachada vegetal?
- ¿Existe alguna diferencia entre las temperaturas superficiales de una fachada vegetal y una convencional?

Los sistemas de fachada vegetal elegidos para esta investigación se diferenciaban por los materiales utilizados, el tipo de planta y la configuración global del cerramiento según se indica a continuación:

Fachada número 1

Tipo de fachada: fachada con plantas trepadoras;

Orientación: noroeste;

Tipo de planta: trepadora hederá helix;

Condición de la planta: bien crecida, fachada totalmente cubierta (20 cm de espesor aproximadamente);

Edad de la planta: más de 25 años;

Material de fachada del edificio: albañilería (ladrillos de barro);

Ubicación: Delft, zona urbana.

Fachada número 2

Tipo de fachada: fachada con plantas trepadoras y estructura de soporte;

Orientación: nordeste;

Tipo de planta: trepadora *hederá hélix*;

condición de la planta: bien crecida, fachada no completamente cubierta;
(10 cm de espesor aproximadamente)

Edad de la planta: entre 2 y 3 años;

Estructura de soporte: marco de acero;

Cavidad de aire entre la fachada y las hojas: 20 cm;

Material de fachada del edificio: albañilería (ladrillos de barro);

Ubicación: área urbana densa, Rotterdam.

Fachada número 3

Tipo de fachada: fachada vegetal con macetas;

Orientación: oeste;

Tipo de planta: diferentes especies de plantas perennes;

Condición de la planta: bien crecida, fachada no completamente cubierta
(10 cm de espesor aproximadamente);

Edad de la planta: menos de 1 año;

Estructura de soporte: macetas llenas de tierra (con espesor de 22 cm);

Cavidad de aire entre la fachada y las jardineras: 4 cm;

Material de fachada del edificio: madera;

Ubicación: zona rural;

Los tres sistemas de fachada se encontraban en los Países Bajos (provincia de Zuid-Holland), instalados en edificios a menos 20 km el uno del otro. La toma de datos de temperatura y velocidad del viento se llevó a cabo tanto en las paredes testigo como en las fachadas vegetales para comparar en cada caso la influencia de la vegetación. En el caso de la fachada número 3, la comparación no se pudo realizar al no haber disponible una fachada testigo. En todos los casos, las mediciones se realizaron a 1.50 m de altura en una superficie de 1 m² y en los siguientes puntos:

- en el interior de las hojas;
- a 10 cm de la superficie;
- a 1 m de la superficie.

La temperatura superficial se midió en el interior y en el exterior de las fachadas verdes y de las fachadas testigo. En la fachada número 3 se tomaron medidas adicionales en la cavidad de aire detrás de las macetas. En total, se realizaron 10 mediciones en cada caso durante el período de septiembre hasta finales de octubre. Para cada medición se tomaron 10 muestras, por tanto un total de 100 muestras para cada sistema analizado con un registro de datos por medición cada 15 s. Para todos los sistemas verdes analizados, en comparación con las fachadas testigo, no se registraron diferencias significativas en la temperatura del aire a partir de 1 m hasta 10 cm por delante

de las fachadas. Esto se debe probablemente al hecho de que las mediciones se llevaron a cabo en otoño sin radiación solar directa y con temperaturas superficiales exteriores inferiores a 18 °C. Teniendo en cuenta estos factores, se propusieron nuevas mediciones para el resto de estaciones, con el objetivo de comprobar la extensibilidad o no de estos resultados a todo el año.

El perfil de viento en la fachada número 1 muestra una disminución de la velocidad del viento de 0.43 ms^{-1} en el interior del follaje en comparación con la velocidad medida a 10 cm de la superficie exterior de la fachada testigo. La velocidad del viento en el interior del follaje tendía a ser prácticamente cero. Para la fachada número 2, la velocidad del viento en el interior del follaje disminuye en 0.55 ms^{-1} ; sin embargo, aumenta en el interior de la cavidad de aire. El perfil de la velocidad del viento para el sistema número 3 muestra una disminución de 0.46 ms^{-1} .

Los perfiles de velocidad del viento obtenidos muestran cómo el follaje influye en la disminución de la velocidad del viento. El aumento de la velocidad del viento dentro de la cavidad de aire (20 cm) del sistema número 2, apenas apreciable en el interior de la cavidad de aire (4 cm) del sistema número 3, se puede explicar de dos maneras. Por un lado, la diferencia de espesor de la cámara influye en el movimiento de aire, resultando ser mayor al aumentar el espesor de la cámara. Por otro lado, el sistema número 3 está constituido por una serie de capas poco porosas (filtro, plástico, sustrato) que no se pueden paragonar a la permeabilidad del follaje del sistema número 2.

Los resultados muestran el potencial de los sistemas vegetales en la reducción de la velocidad del viento alrededor de las fachadas de los edificios. El tipo de sistema utilizado y sus propiedades (follaje, porosidad, materiales,

etc.) influye en este sentido. Puesto que la transmitancia térmica de un cerramiento depende, entre otras cosas, de la velocidad del viento alrededor de la superficie del edificio, la aplicación de un sistema vegetal puede mejorar las propiedades térmicas de la fachada del edificio.

En general, el cálculo estandarizado de la transmitancia térmica de una construcción supone una velocidad del viento exterior de 4 ms^{-1} para el cálculo del coeficiente exterior de transferencia de calor (R_e resistencia de la superficie exterior = $0.04 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$). Para las superficies interiores, la norma prevé una velocidad del aire de 0.2 ms^{-1} (R_i resistencia de la superficie interior = $0.13 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$). En la fachada número 1, se midió una velocidad del viento inferior a 0.08 ms^{-1} en el 90 % de los casos. Para la fachada número 3 la velocidad del viento resultó ser inferior a 0.1 ms^{-1} en el 85 % de las mediciones. Cuando la velocidad del viento exterior es menor de 0.2 ms^{-1} (velocidad del viento interior estándar para el cálculo), debido a la contribución del follaje o a las otras capas de cerramiento involucradas, R_e se puede igualar a R_i .

Puesto que la investigación se centró en la identificación del perfil de velocidad de viento dentro y detrás de los sistemas verdes y en el posible efecto sobre la resistencia térmica, las conclusiones principales que pueden extraerse de los resultados presentados son las siguientes:

- no se encontraron diferencias en la temperatura del aire ni en los perfiles de viento a partir de 1 m por delante de las fachadas hasta el interior del follaje;
- las soluciones de fachada vegetal estudiados actúan como sistemas de

protección solar, debido a la reducción de las temperaturas de la superficie detrás de la capa verde en comparación con las fachadas desnudas;

- en el interior del follaje de los sistemas número 1 y 2 y en la cavidad de aire del sistema número 3 se registró una velocidad del viento muy baja (0.08 ms^{-1} 0.1 ms^{-1} respectivamente);
- la velocidad del viento más alta medida en la cavidad de aire de 20 cm de espesor del sistema número 2 demuestra que es posible hablar de un espesor de aire óptimo alrededor de 40 mm...60 mm para los sistemas de fachada vegetal;
- consecuencia de la reducción de la velocidad del viento medida (0.2 ms^{-1}), el coeficiente de resistencia superficial exterior (R_e) podría ser equiparado al coeficiente de resistencia térmica superficial interior (R_i). Esto afectaría a la resistencia térmica total de la fachada, aumentando en $0.09 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ y traduciéndose en ahorro de energía.

$0.26 \text{ W m}^2 \text{ K}$

Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings

G. Pérez, L. Rincón, A. Vila, J.M. González, L.F. Cabeza

Applied Energy, 2011

Esta investigación se divide en tres líneas de estudio. En primer lugar, propone una clasificación de los sistemas de fachada vegetal. Esta clasificación considera tanto los sistemas tradicionales como los sistemas más recientes. En segundo lugar, resume los mecanismos de funcionamiento de las fachadas

vegetales como sistemas pasivos de ahorro de energía. En tercer lugar, realiza un estudio sobre una fachada verde de doble piel situada en un edificio real en condiciones de clima mediterráneo continental.

Al igual que los techos verdes, los sistemas de fachada vegetal se pueden diferenciar en sistemas extensivos e intensivos. Los sistemas extensivos son más fáciles de construir y requieren un mantenimiento mínimo, a diferencia de los intensivos. En los sistemas extensivos las plantas trepadoras o arbustos se desarrollan a partir de estructuras de soporte (la misma pared o una estructura adicional) normalmente rígidas. Las plantas crecen directamente desde el suelo o en macetas a diferentes alturas de la fachada. Este tipo de fachadas se pueden dividir en tres sistemas diferentes: las fachadas verdes tradicionales donde las plantas trepadoras usan la fachada como material de apoyo, las fachadas de doble piel donde la vegetación se desarrolla en una estructura de soporte separada de la pared y el sistema constituido por macetas perimetrales desde donde la vegetación cuelga. Los sistemas intensivos están constituidos por paneles y/o fieltros geotextiles, a veces precultivados, fijados a un soporte vertical o a la propia estructura de la pared. La vegetación típica de este tipo de sistema son plantas de revestimiento, helechos, arbustos pequeños, y flores perennes.

La utilización de las fachadas vegetales como sistemas pasivos de ahorro energético se basa en cuatro mecanismos fundamentales:

- la interceptación de la radiación solar debido a la sombra producida por la vegetación;
- el aislamiento térmico proporcionado por la vegetación y el sustrato;

- la refrigeración producida por la evapotranspiración a partir de plantas y sustrato;
- la reducción de la velocidad del viento en las capas próximas a la fachada.

Desde los años 80, se han llevado a cabo distintos estudios centrados en el análisis de estos cuatro mecanismos. En los últimos años, el perfeccionamiento de programas informáticos de simulación ha permitido investigar los efectos de la vegetación a una escala más amplia, a pesar de no haber conseguido aún una herramienta que permita una descripción perfecta del comportamiento termo-físico de las superficies vegetales en los edificios.

Con el fin de estudiar el comportamiento de una superficie vegetal en un edificio real, los autores tomaron y analizaron datos de tres fachadas de doble piel instaladas en un edificio en la ciudad de Golmés, cerca de Lérida, Cataluña. La estructura de soporte de la vegetación se encontraba a 0.8 m de distancia de las fachadas noroeste y sudoeste del edificio y a 1.5 m de la fachada sudeste.

En los tres frentes se plantó *Wisteria sinensis*, una planta trepadora caducifolia que se caracteriza por su rápido crecimiento y gran desarrollo, bien adaptada a las condiciones del clima mediterráneo continental seco. Las mediciones se realizaron semanalmente a las 14:00 h durante el periodo de abril a septiembre de 2009, tomando diferentes puntos ubicados en el exterior y en el espacio comprendido entre la estructura y la fachada. Esta distribución permitió comparar el comportamiento de la fachada verde según las distintas orientaciones y las condiciones exteriores. Los parámetros monitorizados fue-

ron la iluminancia (Lux), la temperatura del aire, la humedad relativa (%), la temperatura de la superficie de la fachada (°C), y la velocidad del viento en el exterior (estimación basada en la escala de Beaufort).

Aunque el número de mediciones efectuadas no sea suficiente como para extrapolar conclusiones significativas desde el punto de vista cuantitativo, los autores afirman que los valores registrados tanto de iluminancia como de temperatura superficial de la pared demuestran la gran capacidad de la pantalla verde para obstruir la radiación solar. Los valores de temperatura ambiente y humedad confirman que la fachada verde crea un microclima en el espacio intermedio, que se caracteriza por una temperatura más baja y una humedad más alta. Este hecho corrobora el papel de la fachada verde como barrera contra el viento y muestra el efecto de la evapotranspiración de las plantas.

Comparative life cycle analysis for green facades and living wall systems

M. Ottelé, K. Perini, A.L.A. Fraaij, E.M. Haasa, R. Raiteri

Energy and Buildings, 2012

En esta investigación, el análisis del ciclo de vida (ACV) se utiliza como herramienta para calcular el impacto medioambiental de producción, uso, mantenimiento y residuos de cuatro sistemas comunes de fachada vegetal en los edificios. El objetivo planteado es comparar el impacto medioambiental y los beneficios de los sistemas verdes con una pared de ladrillo visto. Las soluciones de fachada analizados son los siguientes:

1. ladrillo visto;

2. ladrillo visto + planta trepadora;
3. ladrillo visto + soporte vertical + planta trepadora;
4. ladrillo visto + sistema de contenedores con sustrato y plantas;
5. ladrillo visto + capa de fieltro con plantas.

La base de datos utilizada para desarrollar los modelos de análisis se apoya en la base de datos nacional holandesa de Medio Ambiente, compilada por el Instituto Holandés de Biología y Ecología de la Construcción (NIBE). El conjunto completo de categorías de impacto ambiental es conocido como "perfil ambiental" se divide en diez categorías:

- agotamiento abiótico (kg equivalentes de Sb);
- calentamiento global (kg equivalentes de CO₂);
- agotamiento de la capa de ozono (kg equivalentes de CFC-11);
- toxicidad para los humanos (kg1.4-DB equivalentes);
- ecotoxicidad de agua dulce (kg1.4-DB equivalentes);
- ecotoxicidad de agua marina (kg1.4-DB equivalentes);
- ecotoxicidad terrestre (kg1.4-DB equivalentes);
- oxidación fotoquímica (kg equivalentes de C₂H₄);
- acidificación (kg equivalentes de SO₂);
- eutrofización (kg equivalentes de PO₄).

En este análisis de ciclo de vida (ACV) sólo se analizaron los componentes de la construcción directamente relacionados con la fachada. La pared de ladrillo desnuda se toma como base para cada uno de los inventarios de materiales. En general, una fachada es una barrera contra las condiciones ambientales que separa el interior y el exterior del edificio. En la actualidad, un sistema de fachada verde consta de una capa adicional incorporada al conjunto del cerramiento. La diferencia entre las cantidades de material de la fachada desnuda y las otras soluciones de fachadas depende de las capas implicadas en función de las características del elemento vegetal.

En el sistema número 2, la única capa que se añade está formada por las plantas enredaderas. El sistema número 3 incluye, además, un soporte de acero inoxidable. En el sistema número 4, se considera una capa adicional compuesta por macetas, sustrato y plantas. En el último sistema, la capa añadida está compuesta por varias capas de fieltro que sirven para el enraizamiento, la impermeabilización y el soporte de las plantas. Los materiales utilizados para este inventario se obtuvieron a partir de la información proporcionada por las empresas.

Todas las distancias de transporte utilizadas eran hacia y desde la ciudad de Delft (Países Bajos). El período de análisis para estudiar los aspectos ambientales y los impactos potenciales se basó en la vida útil de una fábrica de ladrillo. La esperanza de vida para todas las fachadas se supuso de 50 años. La frecuencia de reposición de las plantas para el sistema número 4 se estableció en 10 años (10 % de reemplazo/año) y 3.5 años (30 % de reemplazo/año) para el sistema número 5. Para todos los sistemas se tuvo en cuenta la posibilidad de reciclaje y reutilización.

Todos los sistemas estudiados revelan categorías de impacto similares, con diferencias considerables en cuanto a magnitud. La causa de tal diferencia se debe principalmente al material de soporte y al reemplazo de las plantas y los materiales. Por este motivo, el sistema número 5 tiene el mayor impacto para el calentamiento global y la ecotoxicidad de agua dulce, ya que es necesario sustituir los paneles cinco veces durante la vida útil de la fachada. El perfil de toxicidad para los humanos muestra un mayor impacto para los tres tipos de sistema verde con soporte (número 3,4 y 5). En los sistemas estudiados, la vegetación contribuye a la carga medioambiental sólo por el transporte, que depende, a su vez, de la frecuencia de sustitución que requiera cada sistema.

El sistema de vegetal número 2 tiene un perfil de alto impacto debido a la utilización de acero inoxidable. Por tanto, en este caso una solución para reducir la carga medioambiental podría ser la utilización de otros materiales con la misma función de soporte vertical para la vegetación (madera dura, polietileno de alta densidad). La máxima carga medioambiental corresponde al sistema número 5, ya que es difícil reciclar el panel y la carga ambiental de los residuos tiene un perfil de impacto similar al de realización. El impacto se podría disminuir con una mayor integración del sistema en la envolvente del edificio, eliminado, por ejemplo, la mampostería exterior.

Los beneficios derivados de la capa vegetal dependen de la tasa de crecimiento de las plantas. Así, para los sistemas número 2 y 3 se calcula que se necesitarían 20 años para un crecimiento completo. En el caso de los otros dos sistemas, se considera que la fachada estaría totalmente cubierta de vegetación desde el primer momento. Para calcular el ahorro de energía en calefacción, debido al aumento de las propiedades aislantes de los sistemas

verdes, se supone una resistencia térmica adicional de $0.09 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$. Esta suposición se utiliza para todos los sistemas verdes analizados debido a la existencia de una capa de aire estancado en el follaje. Para los sistemas que incorporan sustrato, se consideran las transmitancias térmicas del sustrato y de los materiales incluidos.

Para cuantificar los beneficios derivados del ahorro de energía (aumento de valor de resistencia térmica), se desarrolló un modelo de simulación con el programa Thermo Microsoftware 8.0. Para ello se consideraron dos situaciones climáticas diferentes: el clima templado de los Países Bajos y el clima mediterráneo de Italia. El ahorro de energía debido al potencial de refrigeración de los cuatro sistemas de fachada verde se basa en la investigación llevada a cabo por Alexandri y Jones. En este citado estudio, se asocia la disminución de la temperatura en la calle a la utilización de fachadas verdes, consiguiendo, a su vez, reducir el uso de aire acondicionado.

Asimismo, la utilización de la biomasa producida (captura de CO_2) por la poda de las plantas trepadoras de los sistemas número 2 y 3, así como, por la sustitución de las plantas los sistemas número 4 y 5, se puede convertir en energía (k W h); aunque el cálculo de este beneficio muestre un impacto muy pequeño respecto al total de los beneficios ambientales.

Las categorías de impacto afectadas por el ahorro de energía en calefacción y refrigeración son: el calentamiento global, la toxicidad humana y la ecotoxicidad de agua dulce. Las conclusiones derivadas de esta investigación son las siguientes:

- El sistema número 2, basado en la utilización de plantas trepadoras,

presenta una carga ambiental muy pequeña; ya que no necesita ningún material adicional y, por tanto, supone siempre una elección sostenible.

- El sistema número 3 tiene una carga ambiental alta, debido a la utilización de un soporte vertical de acero inoxidable. La elección de otro material podría ser una opción viable sobre todo para clima mediterráneo, debido a los ahorros de energía que proporciona, tanto para calefacción como para refrigeración.
- En el sistema número 4, los materiales utilizados para las macetas no tienen una huella mayor dado que las capas adicionales afectan positivamente a la resistencia térmica del sistema. La carga medioambiental del sistema podría ser mejorada con una mayor integración en la envolvente del edificio, combinando diferentes funciones.
- El sistema número 5, basado en capas de fieltro, presenta una alta carga ambiental debido a la escasa durabilidad de los materiales utilizados.

Otras categorías podrían ser relevantes en la utilización de fachadas verdes. Sin embargo, no se incluyen en este análisis tanto por la falta de datos fiables como por incompatibilidad de los beneficios con las herramientas y categorías de análisis manejadas en este estudio. Esas categorías están relacionadas principalmente con beneficios ecológico-ambientales a macro escala:

- aumento de la biodiversidad;
- salud humana;
- mejora de la calidad del aire, relacionada principalmente con la reducción de los niveles de polvo;

- reducción del efecto isla de calor.

3.3. Estudio sobre los efectos provocados por las envolventes vegetales en edificios y entornos

Las fachadas y las cubiertas vegetales son componentes del edificio y, como tales, influyen en el flujo de calor que atraviesa la superficie que ocupan. A diferencia de otros elementos constructivos, las superficies vegetales son elementos vivos que interaccionan con el ambiente y el edificio de maneras muy diversas, lo que supone efectos tan significativos como los siguientes:

- reducción de la demanda energética de calefacción y refrigeración;
- reducción del efecto isla de calor urbano;
- regulación del ciclo hidrológico;
- filtración de contaminantes presentes en el aire;
- reducción del ruido en el entorno urbano;
- protección de la biodiversidad en el entorno urbano;
- beneficios sociales y psicológicos.

En los párrafos que siguen describo los efectos citados, basándome en los resultados obtenidos en investigaciones previas. La protección de la biodiversidad en zonas urbanas, así como, los beneficios sociales y psicológicos

derivados de la instalación de envolventes vegetales son temas de gran interés, pero no son objeto de la presente investigación y, por tanto, no se desarrollan. La mayoría de la documentación científica a la que me refiero corresponde a los estudios seleccionados y descritos en los párrafos 3.1 y 3.2 de este mismo capítulo. El resto de documentación que he ido consultando a lo largo de la investigación se encuentra referenciada para una mayor profundización. Toda la documentación consultada se incluye en la bibliografía.

3.3.1. Reducción de la demanda energética para calefacción y refrigeración

Desde la antigüedad, son conocidos los efectos de las envolventes vegetales como aislantes térmicos en climas fríos y como elementos que evitan el sobrecalentamiento de las superficies en climas cálidos. Aunque estos efectos tuvieran mucho mayor peso antes de la difusión de los modernos materiales aislantes, hoy en día estos efectos se siguen considerando como unos de los principales beneficios proporcionados por las envolventes vegetales en los edificios. Los mecanismos que regulan el comportamiento termofísico de la vegetación varían en verano e invierno. En verano, la vegetación actúa como una capa protectora que sombrea los elementos de la envolvente frente a la radiación solar, cuya eficacia depende del tipo de vegetación y de la densidad de las hojas, expresadas por el índice de las superficies de las hojas, conocido como índice de área foliar (*Leaf area index, L.A.I. en inglés*).

Aunque la superficie de la envolvente pueda ser sombreada mediante elementos que no sean vegetales, dichos elementos reflectarían o absorberían en

mayor o menor medida la radiación solar recibida; traduciéndose en reflexión solar hacia los edificios próximos, o bien, transmisión de calor en las capas inferiores de la envolvente. La gran ventaja del uso de vegetación en sistemas de cubierta y fachada está vinculada a la capacidad de las plantas de absorber la mayor parte de la radiación solar recibida y la consiguiente utilización de la misma para sus funciones biológicas (evapotranspiración, fotosíntesis, etc.).

Mientras existe suficiente cantidad de humedad en el sustrato, la evapotranspiración es proporcional al estrés térmico, lo que significa que este mecanismo de enfriamiento biológico se adapta a las condiciones ambientales maximizándose cuando la irradiación solar es alta, es decir, los momentos de mayor demanda de refrigeración en los edificios.

Considerando que el aire entre las hojas se mantiene a una temperatura relativamente baja y la capa de vegetación sombrea la superficie, la parte superior del sustrato consigue mantenerse a una temperatura más baja que la temperatura ambiente. Si consideramos la gran capacidad térmica del sustrato, sobre todo cuando el contenido de humedad es alto, las envolventes vegetales ejercen la función de disminuir la temperatura de la capa exterior de los cerramientos, evitando así una excesiva exposición a la radiación solar.

Este sistema de enfriamiento funciona durante las temporadas cálidas del año. En las temporadas frías, la evapotranspiración es limitada y la sombra no resulta ser el factor más relevante. Por otro lado, la respiración de las raíces evita el congelamiento de las raíces y mantiene el sustrato en contacto con ellas a una temperatura más superior a la temperatura ambiente.

A pesar de que el aumento de la resistencia térmica sea limitado (Eumor-

fopoulou y Aravantinos, 1998), la estabilidad térmica y la ausencia de picos bajos de temperatura se reflejan, en mayor o menor medida, en un descenso de las pérdidas térmicas dependiendo del tipo de sustrato utilizado.

Las conclusiones de distintos estudios sobre el ahorro energético en calefacción y refrigeración derivado de la instalación de superficies vegetales resultan en ocasiones contradictorias, sobre todo cuando se basan en simulaciones. Esto se debe en parte al gran número de parámetros necesarios para describir los fenómenos físicos que tienen lugar en el interior del volumen vegetal. Con el objetivo de facilitar el estudio muchas veces se asumen simplificaciones que pueden alterar los resultados. Las condiciones climáticas son otro factor muy decisivo a tener en cuenta cuando se trabaja con envolventes vegetales. Por este motivo, los resultados de las investigaciones llevadas a cabo en lugares con climas muy diferentes pueden llegar a ser incongruentes.

La mayoría de los estudios experimentales realizados sobre el comportamiento energético de las envolventes vegetales se basa en comparar las temperaturas superficiales y el flujo de calor que atraviesa un cerramiento convencionales y con acabado vegetal. A pesar de que la mayoría de las investigaciones se centren en cubiertas verdes, en los últimos años ha aumentado el número de trabajos enfocados a la caracterización del comportamiento térmico de las fachadas.

Wong et al. (2007) realizaron mediciones de temperatura en cubierta antes y después de la construcción de cuatro cubiertas verdes extensivas en un aparcamiento de varias plantas en un clima tropical. El techo verde objeto de estudio carecía tanto de capa de drenaje para el control de la humedad como de sistema de irrigación. La investigación demostró que bajo las mismas

condiciones climáticas se llegaba a dar una diferencia de temperatura de 18 °C en ambas cubiertas. Esta diferencia se invertía en las temporadas secas. A partir de esos datos, se calculó un 60 % de reducción de las ganancias térmicas en el caso de la cubierta vegetal. Efectivamente, se pudo concluir que estos sistemas actuaban como una capa de aislamiento adicional, minimizando el flujo de calor entrante durante las temporadas cálidas. Al contrario de lo que ocurría con los aislamientos tradicionales, se comprobó que durante las horas del día con mayor radiación solar el flujo de calor tomaba sentido contrario, del interior al exterior de la cubierta, removiendo por tanto el calor desde el interior del edificio. Otra conclusión de la investigación apuntaba que cuanto más densa fuera la vegetación, tanto mejor sería la capacidad de enfriamiento de la cubierta.

Onmura et al. (2001) llevaron a cabo un estudio en Japón para evaluar el enfriamiento evaporativo de las cubiertas ecológicas con irrigación controlada. La investigación se desarrolló en un túnel de viento, realizando mediciones de campo en un edificio acondicionado donde la temperatura se mantenía entre 24 °C y 26 °C. A pesar de que la humedad relativa exterior, alrededor del 73 %, no favoreciera la evapotranspiración, se demostró que la temperatura superficial de la cubierta verde era más baja que la temperatura ambiente durante el día, 30 °C inferior a la temperatura del techo sin cubierta ecológica. Se estimó una reducción del flujo entrante del 50 % respecto a la cubierta convencional. El estudio en el túnel de viento demostró que la humedad del sustrato influía en el gradiente de temperatura del mismo.

En Grecia, Niachou et al. llevaron a cabo un estudio experimental sobre el comportamiento energético de una cubierta verde de un hotel cerca de

Atenas. La investigación se basó en registrar las temperaturas superficiales y del aire durante el mes de Agosto. Las temperaturas de las hojas, medidas a través de la cámara termográfica oscilaban entre los 26 °C y los 38 °C. El confort térmico de la habitación bajo la cubierta verde mejoraba 2 °C en comparación con la habitación bajo la cubierta convencional. La simulación mostró que el efecto del techo verde en invierno era menor en el caso de cubiertas bien aisladas, siendo aún mayor dicho efecto en cubiertas sin aislamiento. Durante el día, las temperaturas interiores en la habitación bajo cubierta verde eran inferiores a las registradas en la habitación bajo cubierta convencional. Sin embargo, durante la noche las temperaturas eran menores a pesar de que el efecto disminuyera a medida que el aislamiento de la cubierta convencional aumentaba. El mayor ahorro energético obtenido para un cerramiento convencional sin aislamiento fue del 37 %, frente al 2 % del cerramiento aislado.

Otro estudio de simulación desarrollado en Grecia (Spala et al, 2008) obtuvo una disminución del 58 % en carga de refrigeración en la planta de un edificio bajo techo verde; mientras que, en el caso de las dos plantas inferiores, la reducción fluctuaba entre el 15 % y el 39 % en condiciones de verano. Durante el período de invierno, la carga de calefacción oscilaba entre el 2 % y el 8 % para todo el edificio, a excepción de la planta más alta donde la oscilación era entre el 5 % y el 17 %. El estudio demuestra que las cubiertas verdes poseen un mayor efecto en condiciones de verano, aunque sus beneficios también se perciban en invierno. Tal y como indican los investigadores, este resultado supone un gran avance, ya que las estrategias que persiguen disminuir cargas de refrigeración normalmente suelen conllevar, a su vez,

desventajas en invierno.

A través de la investigación de Sonne (2006), se midieron las temperaturas de la superficie de un techo verde y un techo convencional, registrando una diferencia media de temperatura máxima de 21 °C (54 °C para la convencional y 33 °C para la vegetación). Durante la noche, las temperaturas superficiales del techo verde se mantuvieron más altas que las del techo convencional, debido a la inercia térmica y a la disminución de las pérdidas por radiación hacia la bóveda celeste.

A partir del análisis comparativo entre una cubierta convencional y una cubierta verde sin sistema de riego en dos edificios en Portland (EE.UU), Spolek (2008) se basó en mediciones de temperatura y calculó reducciones de flujo de calor de un 13 % en invierno y un 72 % en verano para el caso de la cubierta verde. Como consecuencia de la elevada inercia térmica del sustrato, los picos de temperatura en el caso de la cubierta verde registraron un desfase de 4-6 horas respecto de la temperatura ambiente y la temperatura superficial de la cubierta convencional.

Sailor (2008) realizó un estudio para verificar la dependencia de las propiedades térmicas del sustrato respecto del contenido de humedad. De este modo, demostró que existía una gran diferencia entre sustratos húmedos y sustratos secos. La conductividad térmica en una variedad de muestras de sustrato ascendió a $0.038 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ al aumentar en un 10 % la saturación del suelo y para un calor específico de $32 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$. Sin embargo, en la mayoría de las mezclas de sustrato examinadas, el albedo se reducía prácticamente a la mitad en mezclas con un 60 % de humedad en comparación con mezclas secas. En un sustrato saturado, como puede ser el caso de una

superficie bajo riego, el albedo puede llegar a ser hasta cinco veces más bajo que el albedo del mismo sustrato seco. Las conclusiones de la investigación indican que los estudios de cubiertas verdes basados en análisis en estado estacionario resultarían incongruentes debido a la dependencia existente entre las propiedades térmicas de la humedad y la variación en la humedad del sustrato durante el día.

Considerando que el flujo térmico total entrante o saliente de un edificio a través de un techo verde está relacionado con el tamaño de la cubierta, cuanto mayor sea la superficie del techo respecto a la superficie total de los cerramientos exteriores, mayor será el efecto sobre las ganancias térmicas. Como demuestra el estudio realizado por Martens en 2008, los edificios de una sola planta son los que más beneficios obtienen de la instalación de una cubierta vegetal, mientras que en los edificios de varias plantas el efecto a lo largo del año se limita a la planta superior.

La necesidad de predecir el comportamiento térmico de las cubiertas verdes ha llevado a diversos científicos a proponer modelos de simulación en régimen transitorio que incluyeran todos los intercambios de calor de una cubierta verde. Uno de los modelos más referenciados, validado y utilizado en estudios posteriores, fue el desarrollado por Palomo (1998). Aunque esta investigación no supusiera implementar ningún programa de simulación, su mayor aportación para el campo de estudio de envolventes vegetales fue el desarrollo de un detallado análisis paramétrico que individualizaba los factores más influyentes en el comportamiento térmico las cubiertas verdes. La conclusión principal del estudio alude al buen comportamiento de la cubierta verde como aislante térmico y su capacidad de minimizar el flujo entrante de

calor.

Basándose en este modelo, Theodosiou (2000) se centró en el estudio de la capa de drenaje de las cubiertas vegetales con el fin de analizar el almacenamiento de agua durante el período de verano. Para ello, utilizó un módulo ligeramente diferente al empleado por Palomo para describir el proceso de evapotranspiración. Después de validar el modelo con datos experimentales registrados durante dos años, llevó a cabo un análisis de sensibilidad paramétrica mediante la implementación del modelo en un programa de simulación. Las conclusiones indican que la densidad del follaje sería el factor más determinante cuando la cubierta se mantiene en condiciones regulares de riego y posee una capa de drenaje como depósito de agua para evitar que el substrato se seque. Estos factores de diseño junto con el espesor del suelo resultan ser los más relevantes para la utilización de la cubierta verde como sistema pasivo de refrigeración (Theodosiou, 2003a). Otra conclusión derivada del estudio revela que los sistemas verdes extensivos se comportan de manera similar a una capa de aislamiento térmico adicional, sin proporcionar refrigeración pasiva, al igual que los sistemas verdes intensivos. Por otro lado, el enfriamiento pasivo resulta ser máximo en cubiertas sin aislamiento y moderado en cubiertas con aislamiento medio. Sin embargo, en el caso de techos bien aislados este efecto se minimiza al estar la capa vegetal suficientemente separada de las capas inferiores. La humedad relativa resultó ser el factor climático más importante: los valores altos de humedad relativa disminuían la capacidad de evapotranspiración y, por tanto, los aportes de refrigeración.

Lazzarin (2005) estudió el potencial de las cubiertas ecológicas como sistemas pasivos de refrigeración mediante mediciones realizadas en una cubierta

de un hospital en Italia, a través de un modelo realizado con el programa de simulación TRNSYS. Los resultados demostraron que en verano, el flujo de calor se dirigía desde el interior hacia el exterior de la cubierta cuando el substrato era húmedo, con el consiguiente enfriamiento del espacio interno. Cuando el substrato era seco, el comportamiento del techo se limitaba a un papel similar al de un aislamiento térmico adicional. Durante el invierno, la cantidad de calor perdida a través de la cubierta vegetal resultó ser ligeramente mayor a la que atravesaría una cubierta convencional en las mismas condiciones. En otro estudio basado en una versión modificada del modelo de Palomo, Theodosiou (2003b) demostró que un techo verde en clima mediterráneo puede proporcionar una refrigeración pasiva sólo cuando la temperatura del aire en el interior de un edificio con aire acondicionado es superior a 23 °C - 24 °C. Cuando la temperatura interna es inferior, el flujo de calor se dirige hacia el interior. A pesar de ello, en este caso se seguían detectando reducciones en la carga de refrigeración en comparación con cubiertas convencionales. La demanda energética resultó ser del orden de 21, 25 y 31 % inferior a la registrada en la habitación bajo cubierta convencional, manteniendo la temperatura a 18 °C, 21 °C, 24 °C y 26 °C, respectivamente.

Otro modelo de techo verde basado en el modelo de Palomo fue validado y utilizado para examinar la influencia de la densidad del follaje sobre el rendimiento energético de una cubierta ecológica en la India (Kumar y Kaushik, 2005). En este estudio los autores indican que la cubierta verde en cuestión, en combinación con protecciones solares, puede bajar aproximadamente 5 °C, la temperatura interior en comparación con una cubierta convencional, proporcionando un potencial de refrigeración de 3.02 kWh al

día.

En 2008, Sailor desarrolló el modelo Ecoroof integrado en el programa de simulación Design Builder. La inclusión de un modelo de cubierta verde en un programa de simulación abrió nuevas posibilidades de investigación sobre el comportamiento térmico de las mismas.

Eumorfopoulou y Kontoleon, demostraron a partir de un estudio realizado en Grecia que las fachadas vegetales constituyen estrategias de enfriamiento muy adecuadas para edificios situados en zonas urbanas de la región mediterránea. Al comparar sistemas convencionales con sistema de fachada vegetal de hiedra, todos ellos instalados en un edificio bajo la misma orientación, se observó que las fachadas con vegetación mantenían temperaturas mucho más bajas y estables que aquellas sin vegetación. Además, los efectos positivos de las fachadas vegetales eran más significativos en días muy calurosos. Por tanto, su instalación en edificios se podría considerar como una óptima solución de mejora de las condiciones térmicas interiores.

En otro estudio realizado en 2009 por los mismos investigadores, se analizó la influencia de la orientación de las fachadas vegetales y de la posición de la capa de aislamiento en la demanda de refrigeración de un edificio. Se demostró que, cuando el edificio contaba con una fachada vegetal, las cargas de refrigeración eran más altas estando colocado el aislamiento en la superficie exterior respecto del caso en el que esta capa se situaba en la superficie interior. Sin embargo, los porcentajes de reducción de la demanda de energía respecto a un edificio sin vegetación variaban en gran medida según la orientación de la fachada en la que se colocaba la capa vegetal, pasando de un máximo del 20,08 % para la orientación oeste a un mínimo de 4,65 % para la

orientación norte.

Wong et al. también demostraron que los efectos de las fachadas vegetales en edificios eran muy positivos en condiciones de verano. En este caso, el parámetro de control elegido fue la temperatura media radiante de los casos analizados. De todos ellos, el resultado más llamativo fue la reducción de 10 °C de la temperatura media radiante de los paramentos en unas condiciones determinadas. Se observó cómo la temperatura de la fachada vegetal era más estable que la temperatura registrada en la fachada sin vegetación. Pérez et al. centraron su investigación en los efectos provocados por unas pantallas vegetales utilizadas como sistema de sombreado en un edificio situado cerca de Lérida. Las mediciones demostraron que las pantallas vegetales creaban un microclima en el espacio comprendido entre la capa vegetal y el cerramiento, caracterizado por temperaturas más bajas y humedades más altas.

El efecto de enfriamiento debido a las fachadas vegetales fue investigado también por Cheng et al. (2010) y se midió en términos de flujo de calor entrante en el edificio. Comparando dos fachadas bajo la misma orientación en un edificio, una convencional y otra con paneles vegetales, se observó que la fachada vegetal registraba durante el día flujos por debajo de 10 Wm⁻²; mientras que en la otra fachada el flujo alcanzaba picos de 40 Wm⁻². Además de la atenuación del flujo entrante en el edificio, se registraron 4 horas de retardo en el aumento de las temperaturas de la fachada con vegetación respecto de la fachada sin vegetación.

En los últimos años, se han llevado a cabo estudios sobre los efectos de la capa de aire en calma que se crea delante de las superficies vegetales y del

sombreado producido por las hojas. En una investigación realizada en Hong Kong, Jim y He desarrollaron y validaron un modelo de transmisión termodinámica para simular la transmisión de calor y las variaciones de temperatura en las superficies vegetales, a fin de ahondar en los efectos de protección solar y sombreamiento.

Perini et al. llegaron a definir un coeficiente de resistencia térmica superficial para las fachadas vegetales basándose en la reducción de la velocidad del viento en las proximidades de los cerramientos verticales que presentan una capa vegetal. Según los resultados de la investigación, la capa vegetal supondría un aumento de $0,09 \text{ m}^2\text{K/W}$ en la resistencia térmica del cerramiento; debido a que el valor de la resistencia superficial exterior, en el caso de las fachadas vegetales, sería equiparable al valor de la resistencia superficial interior.

3.3.2. Reducción del efecto isla de calor

Gran número de estudios científicos que examinan el efecto isla de calor urbana, conocido con el acrónimo UHI (“Urban Heat Island” en inglés), los techos fríos y la vegetación se consideran como las medidas más eficaces para la mejora del microclima urbano si su aplicación fuera a gran escala (Santamouris, 2007). En todos estos estudios, la vegetación está compuesta principalmente de plantas a nivel de suelo y árboles. Aunque la vegetación a nivel de suelo comparte importantes similitudes con la vegetación que se utiliza en las cubiertas verdes, hay algunas diferencias que pueden alterar la eficacia de las cubiertas verdes en términos de mitigación del UHI.

La más obvia es el tipo de plantas utilizadas en las cubiertas extensivas y en las fachadas vegetales. Al tratarse de especies de baja altura, los requisitos de agua son mínimos y los espesores de substratos pequeños. Estas diferencias se minimizan en las cubiertas intensivas, donde hay menos restricciones relativas a la selección de las plantas, por ello suelen ser similares a la vegetación a nivel de suelo.

Sin embargo, aunque los efectos directos de la evapotranspiración en la temperatura del aire sean despreciables, las superficies de las cubiertas verdes objeto de estudio de los estudios mencionados anteriormente, significativamente más frías respecto de las superficies convencionales (incluso hasta 30 °C más frías), muestran que pueden compensar uno de los principales factores que causa el efecto isla de calor urbano: el sobrecalentamiento de las superficies.

En literatura especializada existen pocos estudios que traten en detalle el impacto de las superficies verdes en la mitigación de la isla de calor urbana. Bass et al. (2003), utilizando un modelo matemático, calculó que si se cubrieran un 50 % de las azoteas de la ciudad de Toronto con cubiertas ecológicas sin utilizar ningún sistema de riego, se alcanzaría una reducción de la temperatura del aire de 1 °C en verano. Si todos estos techos fueran regados con regularidad, entonces el efecto de enfriamiento sería de 2 °C sobre el área donde estuvieran instalados y de 1 °C en un área geográfica más amplia.

En un informe del Departamento de Energía de EE.UU, Tanner y Scholz-Barth (2004) señalaron que debido a la capacidad de los techos verdes de absorber la mayor parte de la radiación solar incidente, pueden proporcionar efectos similares a los techos fríos sin reflejar la radiación solar hacia los

edificios más altos adyacentes, evitando cargas adicionales de refrigeración, deslumbramiento y las consecuentes molestias a los ocupantes.

Wong et al. (2003a) midieron la temperatura del aire y la temperatura media radiante en varias alturas por encima de una cubierta convencional y una cubierta verde, registrando una temperatura de 4.2 °C inferior y una disminución de la temperatura media radiante de 4 °C, 5 °C por encima de la cubierta vegetal. En posiciones más altas el efecto de enfriamiento era limitado, quizás debido al tamaño relativamente pequeño de la cubierta verde.

Takebayashi y Moriyama (2007) midieron temperaturas en la superficie de techos con revestimientos reflectantes y en un techo verde con substrato seco en Japón. Se observó que las superficies más frías correspondían a la capa reflectante, seguida de las hojas de la cubierta verde (1 °C - 2 °C más caliente). La temperatura registrada en otras superficies de la cubierta era de varios grados superior. Por otro lado, las mediciones de temperatura superficial tomadas en dos techos verdes de gran superficie en Alemania, mostraron que los substratos húmedos eran capaces de mantener una temperatura de 5 °C más baja en comparación con substratos secos (Kohler et al, 2003).

Alexandri y Jones (2007) utilizaron un modelo bidimensional para estudiar el efecto de las cubiertas y las fachadas verdes en el microclima urbano. Demostraron que, debido a la redistribución de la radiación en el interior de las capas vegetales, los intercambios totales por radiación eran menores en cerramientos con acabado vegetal que en cerramientos convencionales. Si las envolventes vegetales fueran instaladas en áreas urbanas amplias, la vegetación enfriaría las masas de aire que entraran, consiguiendo descender la temperatura del aire a nivel de calle. Los autores concluyen que el efecto de

refrigeración por bajada de temperatura del aire es más intenso en los climas cálidos y secos, como Atenas, pero también las regiones húmedas pueden beneficiarse del enfriamiento del aire a través de las superficies vegetales.

Wong et al. en un estudio realizado en Singapur analizó, entre otras cosas, el efecto sobre la temperatura del aire de diferentes tipos de muros vegetales. Tras analizar ocho sistemas diferentes, concluyó que los efectos de los muros vegetales en la temperatura ambiente dependían en gran medida del tipo de muro. Así, el efecto de los muros sin sustrato era prácticamente inapreciable, mientras que los muros con sustrato inorgánico resultaron ser los más efectivos. La reducción de la temperatura del aire se percibió hasta 0.60 m de distancia del muro, llegando a ser 3.33 m a 0.15 m.

3.3.3. Regulación del ciclo hidrológico

Más allá de los efectos de reducción de la demanda energética de los edificios y del efecto de isla de calor urbano, las envolventes vegetales poseen un gran potencial en la gestión de las aguas de lluvia. Este efecto es mayor en cubierta que en fachada. La impermeabilización de los suelos artificiales en el entorno urbano es la principal razón del rápido escurrimiento del agua de lluvia y de los altos picos en los hidrogramas registrados justo después de las lluvias. Este hecho constituye una fuente de importantes problemas en relación a la sobrecarga de los sistemas de drenaje urbano y la contaminación de agua; ya que el agua de escorrentía de la primera lluvia contiene los niveles más altos de contaminación (USEPA, 2003).

Al proporcionar superficies permeables, las cubiertas verdes pueden rete-

ner el agua de lluvia a corto plazo y, dependiendo del sistema de drenaje, pueden reducir la cantidad de agua de lluvia que llega al sistema de drenaje urbano en las lluvias de baja intensidad.

Thomson y Sorvig (2000) registraron un total de 18 litros de agua llegada al suelo tras una tormenta de 10 mm, en el que 200 litros de lluvia cayeron sobre un techo verde de 18 m². Dependiendo del sistema constructivo del techo verde, el clima y las características de la precipitación, la capacidad de retención del agua de lluvia en base anual puede variar entre un 75 % en techos verdes intensivos equipados con una capa de drenaje y un 45 % en los techos verdes extensivos (Mentens et al., 2006).

Fioretti et al. (2010), en una investigación llevada a cabo en una cubierta ecológica instalada en un edificio de la Universidad de Génova, demostraron que la respuesta hídrica de la cubierta depende principalmente de la cantidad de agua contenida en el sustrato al momento de la lluvia. Es decir, del tiempo transcurrido desde la última lluvia. En el caso de la cubierta estudiada, se observó que el período seco previo a la lluvia era inferior a 96 horas y la reducción de volumen de agua vertida al alcantarillado inferior al 20 %. Sin embargo, si este período se reducía a 12 horas, la reducción de volumen de agua era igual a cero. En general, si el contenido de agua en el sustrato en el momento de la lluvia es mayor que la capacidad de campo, éste no es capaz de almacenar agua de forma permanente o de reducir el volumen de las aguas pluviales. Por otro lado, el sustrato es capaz de limitar el volumen de las aguas pluviales sean cualesquiera las condiciones en las que se encuentre, según confirma un porcentaje de reducción del pico superior al 40 % para todos los eventos de lluvia registrados.

Otras investigaciones (Emillson, 2007; Berndtsson, 2006) mostraron cómo las cubiertas verdes pueden bajar los niveles de algunos contaminantes presentes en el agua de escorrentía que proviene de las cubiertas, siendo éste el que contiene los mayores porcentajes de metales como Zinco. (Gnecco 2005).

A escala urbana, la aplicación generalizada de cubiertas verdes puede constituir parte de la política de gestión de aguas pluviales. Por esta razón, muchas empresas de gestión de recursos hídricos ofrecen descuentos en los impuestos a los propietarios de los edificios con azoteas ecológicas, como por ejemplo la sociedad Clean River de Portland (Liptan, 2003).

3.3.4. Filtración de contaminantes presentes en el aire

Las envolventes vegetales proporcionan una mejora de la calidad del aire debido a la capacidad de las plantas de captura de NO_x y CO₂ del aire urbano (Clark, 2005).

Currie y Bass (2008) explican que cuando las cubiertas ajardinadas están instaladas a suficiente escala urbana, la vegetación que las caracteriza puede llegar a ser tan efectiva como los árboles en la eliminación de PM₁₀. Las mediciones realizadas en una cubierta verde de 4000 m² en Singapur mostraron que los niveles de partículas contaminantes y SO₂ en el aire sobre la cubierta se conseguían reducir entre un 6 y un 37 % (Tan y Sia, 2005).

Yang et al. (2008) modelaron la absorción de contaminantes del aire de 19.8 ha de cubiertas verdes en Chicago y estimaron que la reducción de cuatro contaminantes atmosféricos - O₃, NO₂, PM₁₀ y SO₂ - era de 52 %, 27 %, 14 % y 7 %, respectivamente. Además de estos efectos directos de la vegetación

presente en las cubiertas, la disminución de la temperatura superficial puede conducir a una menor producción de ozono atmosférico (Taha, 1996).

Ottelé et al., en una investigación realizada en 2008 en los Países Bajos, estudiaron la capacidad de las hojas de una fachada vegetal de acumular partículas contaminantes presentes en el aire. Los resultados demostraron que las hojas actuaban como sumidero para una cantidad significativa de sustancias dañinas para la salud, siendo capaces de capturar partículas gruesas, finas y ultra finas, incluyendo PM_{10} .

El lado superior de las hojas mostraba una mayor capacidad de absorción de contaminantes que el lado inferior. Este mecanismo de captura funcionaba mucho mejor en ambiente urbano que en ambiente rural. Además, las partículas finas y ultra finas - las fracciones potencialmente más dañinas para la salud humana - depositadas en las hojas fueron más abundantes que las partículas más gruesas. Finalmente, las investigaciones actuales demuestran que la capacidad de las envolventes vegetales para mejorar la calidad del aire depende en gran medida de las condiciones específicas del lugar. Para que los efectos en la calidad del aire de las ciudades sean perceptibles, se requieren políticas urbanas específicas que fomenten la aplicación generalizada de fachadas y cubiertas verdes.

3.3.5. Reducción del ruido

Renterghem y Botteldooren (2008) estimaron en 10 dB la reducción del ruido urbano debido a la instalación de una cubierta extensiva. Se observó cómo las cubiertas verdes con mayores espesores de substrato carecían de un efecto

adicional significativo.

En otros estudios experimentales sobre cubiertas intensivas, se detectaron reducciones de ruido en el interior de edificios de 8 a 13 dB, en función de la frecuencia (Connelly y Hodgson, 2008); mientras que en otros estudios como el de Dürr (1995) la reducción registrada llegó a ser más alta, próxima a los 46 dB.

El experimento realizado por Wong et al. en ocho tipos de fachadas vegetales muestra una buena atenuación del ruido de frecuencias bajas y medias, debido al efecto absorbente de sonido del sustrato, siendo menor la atenuación para frecuencias altas. A través de una cámara de reverberación construida para este propósito, se intentó determinar el coeficiente de absorción de las fachadas vegetales. Este parámetro resultó ser uno de los más altos en comparación con los valores asociados a otros materiales de construcción y mobiliario. Por un lado, se observó que a medida que aumentaba la frecuencia, el coeficiente de absorción acústica también aumentaba. Por otro lado, cuanto mayor fuera la cobertura de vegetación, mayor era el coeficiente de absorción.

3.4. Conclusiones sobre el estado documental de los trabajos científicos previos

Partiendo de un estudio pormenorizado de la literatura existente relativa al presente campo de investigación, resulta evidente el efecto positivo que la instalación de envolventes vegetales puede tener sobre los edificios en térmi-

nos de eficiencia energética. En relación al comportamiento de los sistemas vegetales en condiciones de invierno, la mayoría de los estudios coinciden en que no pueden sustituir completamente al material de aislamiento, aunque las capas adicionales puedan contribuir a un aumento del efecto de aislamiento térmico.

El nivel de aislamiento adicional proporcionado por las capas de sustrato y vegetación es impreciso, a pesar de estar directamente relacionado con la humedad contenida en el sustrato. Los investigadores coinciden en que, si bien los mecanismos biológicos y físicos que influyen en el comportamiento térmico de las envolventes vegetales son los mismos durante todo el año, el comportamiento general de las superficies verdes varía considerablemente entre las estaciones frías y cálidas. Esto se debe a que la intensidad de los flujos de energía varía de acuerdo con las condiciones climáticas.

En regiones con lluvias frecuentes, el contenido de humedad del sustrato en invierno es alto, reflejándose en la conductividad térmica. En regiones secas, la conductividad térmica es menor y el sustrato proporciona un mejor aislamiento térmico. En consecuencia, el nivel de aislamiento adicional está sujeto a las condiciones climáticas, composición de la mezcla del sustrato y características constructivas de la cubierta verde.

Tal y como todos investigadores indican, el efecto positivo es más evidente durante el período de verano, ya que la presencia de cubiertas y fachadas verdes puede reducir significativamente las cargas de refrigeración. Por otro lado, el potencial de las envolventes vegetales como sistemas de refrigeración pasivos aún no se ha investigado suficientemente como para poder sacar conclusiones claras. En algunos estudios, aunque no sea reconocida la capacidad

de enfriamiento, las mediciones o los datos de la simulación muestran que hay momentos en que el flujo de calor se dirige hacia fuera, con la consiguiente eliminación de calor desde el interior, incluso en los edificios acondicionados. Este fenómeno, abierto a futuras investigaciones, no puede ser impulsado por un aislamiento térmico convencional, puesto que en todos los casos, con un aislamiento convencional, como máximo el flujo dirigido al interior del edificio sería nulo.

De hecho, los investigadores aún siguen debatiendo hasta qué punto el efecto positivo de las envolventes vegetales puede proporcionar un ahorro de energía notable en un edificio. El objeto de esta discusión, lejos de ser consecuencia de enfoques científicos diferentes, derivaría de los siguientes argumentos:

- en literatura especializada se estudian soluciones muy diferentes en relación a los materiales utilizados. Así, algunos sistemas incluyen o prescinden de capa de drenaje en caso de cubierta o sustrato en caso de fachada, además de variar el espesor de las diferentes capas.
- La variedad de vegetación, incluso dentro del mismo experimento, puede alterar significativamente la temperatura de la superficie del sustrato, afectando al comportamiento térmico.
- Cada estudio experimental o matemático se limita a las condiciones climáticas locales.
- En el caso de las cubiertas, un factor crucial en su comportamiento térmico es el contenido de humedad del sustrato y la presencia de agua

en la capa de drenaje. La información relativa a estos factores no siempre es clara en los estudios examinados, dando lugar a importantes diferencias en cuanto a comportamiento térmico. La humedad contenida en el sustrato es también importante para las fachadas, dado que la evapotranspiración en la superficie del suelo y las hojas es altamente dependiente de la disponibilidad de agua en el sustrato durante las horas de estrés térmico. La presencia de sustratos secos en verano limita la cantidad de agua que puede evaporarse, proporcionando un efecto de enfriamiento. Por el contrario, una irrigación regular puede aportar el agua necesaria para promover este proceso y, en consecuencia, conducir a un efecto de enfriamiento pasivo más intenso.

- La temperatura del aire interior en los edificios acondicionados durante el estudio experimental o la simulación es otro factor que no es común en las investigaciones, a pesar de ser un factor significativo en todas las técnicas de enfriamiento pasivo. Este punto asume particular importancia cuando se analiza la capacidad de las envolventes vegetales de aportar refrigeración pasiva (flujo de calor dirigido hacia afuera) o simplemente actuar como un elemento de aislamiento adicional, limitando el flujo de calor dirigido hacia el interior. El aire acondicionado a temperaturas relativamente bajas (20 °C-22 °C) puede “desactivar” el mecanismo de refrigeración pasiva durante las horas más cálidas del día, cuando la temperatura ambiente es 10 °C superior a la temperatura del aire en el interior del edificio.

Dado que la mayoría de las mediciones y de los estudios de simulación

se ha llevado cabo sólo durante los últimos años, resulta obvio que el estudio de cubiertas y, sobre todo, fachadas vegetales constituye un campo totalmente abierto que seguirá dando resultados en el futuro. Estos nuevos estudios se podrán beneficiar de la posibilidad de utilizar modelos de simulación implementados a partir de los actuales programas de simulación y tendrán que centrarse en el desarrollo de nuevos modelos de simulación y predicción del comportamiento de las envolventes vegetales para facilitar su aplicación en diferentes ámbitos. De todo lo anterior, se puede concluir que el comportamiento térmico de las envolventes vegetales es variable y depende de un número relativamente grande de factores. Estos factores no son siempre fáciles de conocer, como por ejemplo la densidad de las hojas y otras características de la vegetación. Sin embargo, otras variables se pueden controlar desde el proceso de diseño de la cubierta: características de la mezcla del substrato, especies vegetales, programa de riego, sistema constructivo, etc.

En cualquier caso, durante el período cálido del año, la definición de las características de las envolventes vegetales a fin de reducir la demanda energética debe tener en cuenta las condiciones climáticas, especialmente la humedad relativa del lugar. Este factor específico es importante ya que los flujos térmicos adicionales que se generan en un techo verde, en comparación con un techo convencional, dependen directamente de la humedad del aire, tal y como ocurre en todas las técnicas de enfriamiento pasivo basadas en la evaporación del agua.

Por otro lado, a pesar del hecho de que las envolventes vegetales tengan un efecto positivo sobre la limitación de las pérdidas térmicas en invierno, no pueden sustituir al aislamiento térmico convencional. Un ligero aumento en

el espesor de la capa de aislante puede tener el mismo efecto a un coste significativamente más bajo. Diversas investigaciones recientes sobre la capacidad de la vegetación y de las capas adicionales de substrato como aislamiento térmico demuestran que aumentar el valor de U con el fin de incluir las capas adicionales constituye un método inexacto; ya que este método simplificado no contempla la variación de las propiedades termofísicas, dependientes de muchos factores como el contenido de humedad.

Muchos estudios experimentales y simulaciones en estado transitorio demuestran que la aportación de las fachadas y cubiertas verdes como aislante no es realmente significativa. Sin embargo, aunque la capacidad aislante en invierno es limitada en comparación con los aislantes convencionales, una superficie verde puede ser considerada como una protección térmica adicional que aporta muchas ventajas de otra naturaleza.

Sobre los efectos que las envolventes vegetales proporcionan tanto a escala urbana como de edificio, la literatura científica está de acuerdo en su carácter beneficioso. La cuantificación de estos beneficios depende de la mezcla del substrato y contenido de humedad, selección de plantas, así como, de las condiciones climáticas, especialmente la humedad relativa al estar directamente relacionada con la evapotranspiración.

Todos los estudios coinciden en que las principales ventajas de las cubiertas y las fachadas verdes en la mitigación del microclima se refieren a la gran cantidad de espacio disponible ligado a las envolventes de los edificios, en contraste con la disponibilidad limitada de superficie a nivel del suelo dentro del entorno urbano. Por otro lado, el efecto de las envolventes vegeta-

les sobre la isla de calor urbana es significativo sólo cuando su aplicación es generalizada, acción que obviamente requiere políticas urbanas debidamente planificadas. Debido al número relativamente limitado de estudios específicos sobre la mitigación de la isla de calor urbana mediante envolventes vegetales, no existen conclusiones absolutas sobre la eficacia de esta tecnología en comparación con los techos fríos, ampliamente investigados.

Además, debido a la gran presencia de superficies verticales en los entornos urbanos, la utilización de fachadas vegetales como sistemas de enfriamiento de la temperatura ambiente parece muy prometedora. Temperaturas ambiente más bajas significarían, a su vez, una temperatura del aire entrante en los sistemas de aire acondicionado más baja, traducándose en una menor carga de refrigeración.

A partir de las conclusiones expuestas, las envolventes vegetales se podrían considerar como una tecnología ecológica donde podrían entrar en conflicto intereses relativos a consumo de agua y conservación de energía. Desafortunadamente aún no existen estudios en este sentido, probablemente esta dicotomía sea resuelta en el futuro.

A pesar de poder considerar las cubiertas verdes como una tecnología madura, constituye una línea de investigación relativamente nueva, de la que se esperan muchos más estudios que apoyen y enriquezcan el conocimiento adquirido hasta la fecha. El campo de estudio de fachadas vegetales se encuentra todavía en fase de desarrollo tecnológico y se prevé que en los próximos años se trabaje en la optimización de los sistemas existentes y el desarrollo de nuevos. La reciente introducción de modelos de simulación térmica y la continua expansión de envolventes vegetales en diversas regiones del mundo con

probabilidad ayuden a los científicos a examinar esta tecnología de manera más completa.

Capítulo 4

Clasificación de las fachadas vegetales existentes

Classificazione delle facciate vegetali esistenti In questo capitolo si procede alla catalogazione dei sistemi di facciata verde esistenti nell'attualità. Da un lato si vuole porre ordine e chiarezza nel vasto panorama delle facciate verdi, analizzando i vari sistemi dal punto di vista costruttivo e specificandone vantaggi e svantaggi. Dall'altro si vogliono fornire gli strumenti necessari per individuare il sistema più adatto allo studio sperimentale. L'ampia analisi di casi di studio porta all'identificazione di un totale di quindici tipi di facciate verdi, suddivisibili in tre gruppi:

- *facciate continue*
- *facciate continue realizzate con elementi modulari*
- *facciate realizzate attraverso elementi puntuali*

Per ogni tipo di facciata analizzato si realizzano schede tecniche nelle quali si evidenziano, attraverso schemi costruttivi e brevi descrizioni, le principali caratteristiche del sistema. Affinchè le schederappresentino nella maniera più fedele possibile il tipo di facciata analizzato, si inseriscono in ogni caso esempi di edifici realizzati con il sistema descritto.

Infine si danno indicazioni rispetto alle tipologie di piante più adatte ad essere utilizzate nelle facciate verdi, tenendo in considerazione la modalità e la velocità di crescita, l'orientamento della facciata e l'altezza massima raggiungibile.

4.1. Clasificación constructiva

Hoy en día, existen en el mercado múltiples sistemas de fachada vegetal, cada uno de ellos con características determinadas que respondan a los requerimientos de cada situación y aplicación. Con el fin último de elegir el sistema más adecuado para el estudio experimental, se ha procedido a estudiar los sistemas existentes, clasificándolos desde el punto de vista constructivo. El estudio ha resultado en un total de 15 tipos diferentes de fachada vegetal, que se pueden subdividir en tres grandes categorías:

- fachadas continuas;
- fachadas continuas constituidas por elementos modulares;

- fachadas constituidas por elementos puntuales.

Para cada tipo de fachada se ha realizado una ficha técnica que, además de proporcionar un esquema constructivo del sistema, analiza sus principales características considerando los siguientes aspectos:

- descripción;
- componentes básicos;
- ventajas;
- inconvenientes;
- industrialización;
- montaje;
- mantenimiento;
- eficiencia energética;
- peso;
- coste;
- reutilizabilidad;

Para favorecer un análisis comparativo entre los diferentes sistemas, muchas de las características se han evaluado a través de una escala numérica, que permite un rápido cotejo de los mismos. Con el objetivo de que las fichas técnicas representaran lo más fielmente posible la solución analizada, en cada caso se han incluido ejemplos de edificios cuyas fachadas han sido realizadas

con el sistema descrito. Por otro lado, hay que indicar que el esquema constructivo realizado para cada sistema no reproduce la solución adoptada en la fachada de un edificio específico, sino que tiene la finalidad de resaltar los componentes principales de cada tipo de fachada, destacando el funcionamiento general del sistema y posibilitando una ágil comparación entre los diferentes sistemas. Por tanto, se trata del esquema constructivo del tipo de fachada objeto de análisis y no se refiere a un ejemplo concreto de un edificio específico.

4.1.1. Fachadas vegetales continuas

Este primer grupo incluye los sistemas desarrollados para un recubrimiento continuo de fachada, proporcionando al edificio una solución homogénea de cerramiento vegetal. Dentro de las fachadas realizadas con elementos continuos distingo cinco grupos:

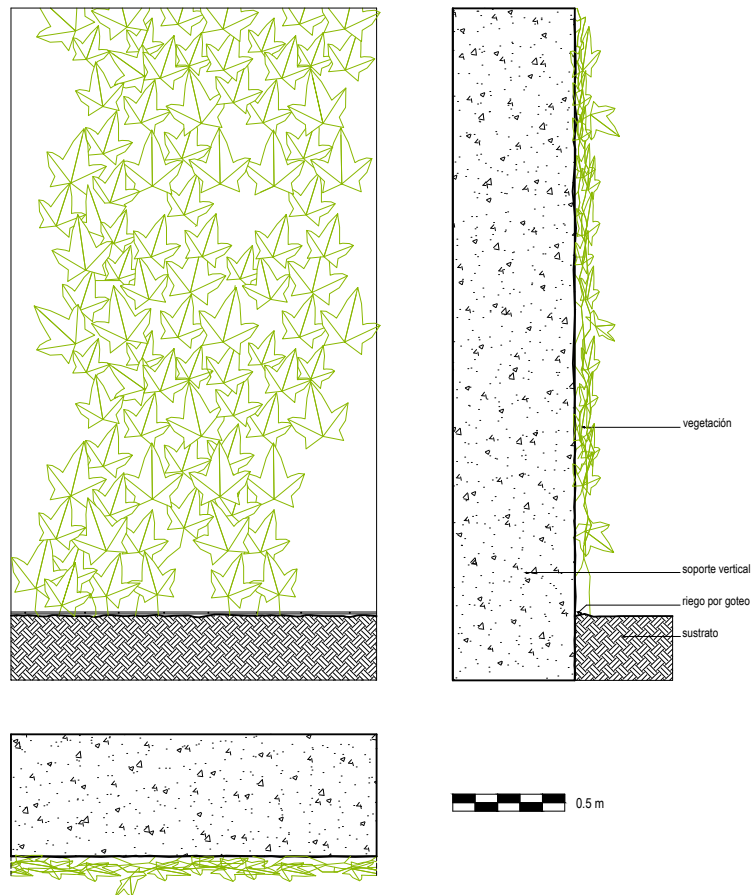
Continuas sin soporte : sistemas que son parte integrante del cerramiento, constituyendo la misma estructura de soporte para el desarrollo de la vegetación.

Continuas con soporte vertical : sistemas formados por estructuras verticales (cables, mallas, etc.) que constituyen la estructura en la que crece la vegetación.

Continuas con soporte horizontal : sistemas constituidos por jardineras o contenedores añadidos al acabado del edificio, que a la vez forman una estructura continua e independiente.

Continuas con soportes vertical y horizontal : sistema que constituye la unión de los dos sistemas previamente descritos. En este tipo de fachadas las plantas crecen en jardineras y gracias a las estructuras de soporte se desarrollan en vertical.

Continuas con soporte adherido a la pared : sistemas realizados mediante estructuras de soporte recubiertas con una capa de fieltro sintético en la que se enraízan las plantas.



4.1.2. Fachadas vegetales modulares

Al segundo grupo pertenecen todas aquellas soluciones que por sus características constructivas pueden ser utilizadas de forma discontinua, constituidas en la mayoría de los casos por piezas independientes. Estas soluciones permiten la fácil adaptación de la solución vegetal al diseño de los cerramientos, incluyendo puertas, ventanas y todo tipo de elementos que rompen con la configuración estándar de la pared. El efecto conseguido es el de un recubrimiento continuo de fachada pero a través de piezas modulares. Los módulos pueden variar en tamaño, material, sistema de anclaje, etc.

Estas fachadas se pueden dividir en tres grupos:

Modulares en caja : sistemas con cajas modulares prevegetadas y ligeras de diferentes materiales y tamaño.

Modulares en bloque : sistemas de fachada realizados mediante piezas modulares en las que se inserta vegetación.

Modulares con gaviones : sistemas realizados mediante piezas modulares de hormigón y constituido por varias capas, cuyo acabado exterior es una estructura de mallas metálicas con piedras y especies vegetales en su interior.

4.1.3. Fachadas vegetales puntuales

Al tercer y último grupo pertenecen las soluciones de fachada realizadas con elementos puntuales, macetas o contenedores, que conforman la fachada de manera discontinua. Estos tipos de sistema en la mayoría de los casos

tienen principalmente una función decorativa. Las macetas pueden variar en tamaño, material, composición y sistemas de integración en fachada. En base a estas diferencias, los sistemas se pueden dividir en tres categorías:

Contenedor simple : sistemas en los que la fachada está conformada por macetas utilizadas como único elemento de composición de fachada. Las macetas pueden variar en tamaño y estar ubicadas tanto en terrazas como en elementos verticales. En este último caso necesitarían una estructura de soporte.

Contenedor apilado : sistemas basados en la utilización de una estructura que a la vez que permite apilar las macetas lleva incorporado el sistema de riego. Se utiliza principalmente para la creación de huertos urbanos.

Contenedor integrado : sistemas orientados para fachadas en las que la vegetación se introduce como elemento decorativo colocado en contenedores integrados en la misma fachada. Estos contenedores pueden conformar un diseño regular de la fachada o estar colocados de manera aleatoria.

4.2. Especies vegetales

La selección de plantas para su aplicación en las superficies verticales depende de la capacidad de adaptación de las especies a un entorno específico, además de otros factores estéticos. La selección de vegetación constituye un proceso delicado en el que deben valorarse las exigencias del clima y la exposición. En lo que se refiere al primero, el número de especies de plantas

trepadoras disponibles para climas cálidos es muy superior a las que crecen en climas templados o fríos. Es importante pues elegir las especies de acuerdo a sus necesidades de temperatura, porque el efecto estético es básico en las fachadas vegetales y éste puede ser muy negativo si, por ejemplo, las heladas afectan a la vegetación. Es conveniente ser prudente y elegir especies de plantas en función de las temperaturas más rigurosas registradas, al menos, en los últimos veinte o treinta años.

Las plantas que se utilicen en las superficies verticales se encontrarán expuestas a condiciones extremas. Por ejemplo, el viento implicará dos efectos inmediatos: por un lado, cuanto mayor sea la altura, más intenso será el viento que soporte la planta; por otro lado, la dirección del viento también variará con la altura, a causa de las turbulencias y corrientes que se generan entre edificios.

El aspecto visual constituye otro de los factores más importantes en la selección de las plantas. Su principal valor es el follaje, y su capacidad para cubrir superficies debe ser una de las prioridades a la hora de seleccionar las especies. Tradicionalmente, las plantas trepadoras se han cultivado por su floración. Este efecto es un valor añadido, al igual que la variabilidad cromática del follaje según el paso de las estaciones. La asociación de plantas trepadoras es un recurso estético importante en la arquitectura vegetal, ya que la combinación de varias especies le confiere mayor naturalidad. La selección debe realizarse de acuerdo a criterios de vigorosidad semejante (para evitar que una especie domine sobre a otra) y según efectos estéticos y cromáticos, combinando especies de follaje atractivo en otoño con plantas de floración primaveral o estival.

En todos los edificios bioclimáticos el diseño de los cerramientos está condicionado por la orientación. En el caso de las fachadas vegetales, la orientación es uno de los condicionantes más importantes a la hora de elegir las especies, esto dará lugar a una diferenciación entre fachadas, no consiguiéndose una homogeneidad estética. La altura máxima que puede alcanzar cada especie y su velocidad de crecimiento son otros factores a tener en cuenta a la hora de elegir la especie más adecuada para la fachada que se quiera realizar. En las tablas siguientes se detallan las características principales de algunas de las especies más utilizadas en el diseño de fachadas vegetales, clasificándolas en tres grandes grupos:

Enredaderas autónomas : no precisan de un soporte especial para sujetarse.

- *Euonymus fortunei*
- *Hedera Helix*
- *Hydrangea Petiolaris*
- *Parthenocissus quinquefolia*
- *Parthenocissus tricuspidata*

Enredaderas no autónomas : aquellas que necesitan soporte especial.

- *Aristolochia sp*
- *Campsis radican*
- *Clematis sp*
- *Clematis vitalba*

- *Jasminum officinalis*
- *Lathyrus odoratus*
- *Locinera* sp
- *Locinera periclymenum*
- *Passiflora*
- *Polyginum baldschuanicum*
- *Trapeolum*
- *Vitis* sp
- *Wisteria floribunda*

Arbustivas : no necesitan soporte y son ramificadas desde la base.

- *Cotoneaster*
- *Forsythia suspensa*
- *Jasminum*
- *Rosa canina*
- *Rubus fruticosus*

Además, las especies se agrupan considerando la orientación más adecuada para cada una de ellas, su velocidad de crecimiento y la altura máxima que puede alcanzar a lo largo de su vida. Aquí se inserta el documento que se llama 2013-08-19-especies vegetales

4.3. Conclusiones sobre la caracterización constructiva de las fachadas vegetales

A partir del estudio realizado, se puede concluir que cada tipología de fachada vegetal pertenece a ámbitos de aplicación específicos y que cada sistema posee ventajas e inconvenientes muy particulares. A la hora de elegir el tipo de fachada a realizar, la primera distinción a plantear es decidir si se desea realizar una fachada cuyo aspecto sea continuo y homogéneo o una fachada en la que la vegetación se utilice de manera puntual. En este segundo caso, la mayoría de las soluciones tienen una función estético-decorativa, que sólo en algunos casos llega a poder ser aplicada como solución para el cultivo de determinadas especies de fruta y verdura. Esta aplicación como huerta urbana en ningún caso se puede considerar como estrategia de ahorro de energía para el edificio. Si por el contrario, el objetivo es realizar una fachada que contribuya a mejorar la eficiencia energética del edificio, habrá que elegir un tipo de fachada “continua”. Gracias a estas soluciones se realiza un recubrimiento total de la fachada que actúa como protección solar, además de proporcionar el resto de ventajas analizadas en el capítulo 3. En relación a este aspecto es muy importante tener en cuenta la presencia o ausencia de sustrato, ya que investigaciones previas han demostrado que la combinación de sustrato y vegetación confiere una mayor efectividad energética respecto de las soluciones que sólo prevén la presencia de vegetación, como por ejemplo los sistemas hidropónicos. Los sistemas que proporcionan este tipo de solución “continua” son muy diferentes entre ellos, algunos realizados

mediante piezas modulares y otros, mediante técnicas que proveen un recubrimiento continuo. Peculiaridades técnicas como el tipo de soporte utilizado, en el caso de las fachadas continuas, o el tamaño y el peso de las piezas, en el caso de las fachadas continuas modulares, son las que determinan los distintos subgrupos de cada categoría. Analizando en detalle las características de cada sistema, se pueden sacar conclusiones sobre la adaptabilidad de cada uno de ellos a las diferentes situaciones que se dan a la hora de realizar una fachada vegetal. El hecho de trabajar sobre edificios existentes o realizar obra nueva es, por ejemplo, determinante en la mayoría de los casos para la elección de un sistema u otro. Otros aspectos relevantes son el grado de eficiencia energética que se puede alcanzar con cada sistema, además del grado de industrialización de la solución, la facilidad de transporte, montaje y mantenimiento. El coste económico y la reutilizabilidad de la solución deben ser tenidos en cuenta como aspectos clave para la sostenibilidad de las soluciones propuestas. Una vez escogido el sistema constructivo, el segundo paso es elegir la vegetación. En base a la solución escogida y a otros aspectos como las características estéticas de las plantas, la orientación de la pared, la velocidad de crecimiento y la altura máxima, se podrán elegir las especies más adecuadas para cada caso.

Cómo se escribe un artículo de investigación

Juan Miguel Campanario

Web: Cómo escribir y publicar un artículo científico. Cómo estudiar y aumentar su impacto (disponible en www.iah.es/otrosweb/jmc)

Artículo de investigación

Título

Autores + Afiliación

Palabras clave

Resumen (abstract)

Introducción + Objetivos

Método

Resultados + Discusión

Conclusiones

Referencias

Agradecimientos

Anexos + Tablas + Figuras

Título

Frase fundamental: último

Explicativo, breve, términos más relevantes

Atractivo y llamativo (¡cuidado!)

Autores

Muy importante: fuente de conflictos

Revistas y asociaciones intentan definir

Criterios de ordenación: Alfabético, Importancia

“Juntos, pero separados”: Explicitar la contribución

Afiliación

Direcciones institucionales

Autor para reprint, Web

Evaluación institucional (ej: memorias de investigación de universidades)

Resumen o abstract

Breve (100-200 palabras)

Bases de datos, Abstracts estructurados

Palabras clave (Keywords)

Bases de datos, Thesaurus, Keyword Plus (ISI)

Introducción - Objetivos

Marco teórico

Planteamiento del problema

Antecedentes

Análisis críticos

Objetivos

Hipótesis

Métodos

Reproducibilidad

Procedimiento

Métodos experimentales

Recursos-aparatos

Sujetos

Medidas realizadas

Enfoques metodológicos seguidos.

Instrumentos utilizados.

Cuestionarios, entrevistas, etc.

Diseño experimental (número y descripción de grupos o muestras, características, etc.).

Características demográficas de sujetos experimentales (edad, género, capacidades, etc.)

Tratamientos realizados.

Sustancias o reactivos que se han utilizado y en qué secuencia.

Instrucciones que se dan a los sujetos

Técnicas de recogida de datos (ordenador, papel, grabación, vídeo, etc.).

Criterios utilizados para decidir en caso de conflictos o problemas metodológicos.

Decisiones tomadas en situaciones imprevistas.

Variables utilizadas para describir los datos (esto a veces se hace en la sección resultados).

Criterios de clasificación de los sujetos, las muestras, los especímenes, los reactivos, etc.

Problemas metodológicos a los que se debería prestar especial atención.

Resultados y discusión

Números o categorías (valores de variables)

Categorías con distribuciones numéricas

Tablas y figuras

Pruebas estadísticas (significatividad)

Comparaciones de tablas y figuras (tendencias, diferencias, anomalías, ...)

Contraste de resultados, de acuerdo con objetivos

Puntos fuertes y débiles de los resultados

Posibles interpretaciones alternativas

Comparación con antecedentes previos

Posibles “artefactos”

Conclusiones

„Son conclusiones?”

Relación con marco teórico, resultados, objetivos

Errores comunes

Repetir resumen

Repetir resultados

Divagar

Agradecimientos

Colaboradores que no sean autores

Instituciones que financian

Editoriales que permiten reproducir materiales

Personas que hayan realizado sugerencias

Capítulo 5

Criterios de selección y diseño del modelo a desarrollar

Criteri di selezione e disegno del modello di facciata Dopo l'analisi e la classificazione dei sistemi di facciata vegetale esistenti attualmente, realizzata nel capitolo precedente, in questo capitolo si prosegue con la selezione del sistema più adatto allo studio sperimentale.

La selezione si basa nel paragone delle principali caratteristiche dei vari sistemi, , analizzati nelle schede realizzate nel capitolo precedente. L'obiettivo generale è quello di scegliere il sistema che con maggiore facilità possa essere applicato in larga scala negli edifici attuali.

I criteri utilizzati per la selezione sono i seguenti:

- *Industrializzazione*
- *Montaggio*

- *Manutenzione*
- *Efficienza energetica*
- *Peso*
- *Irrigazione*
- *Costo*
- *Riutilizzazione*

Essi corrispondono a tre importanti temi quali l'ottimizzazione della produzione di edifici, l'efficienza energetica e la sostenibilità. Dopo un'approfondita analisi, si giunge alla conclusione che il sistema che maggiormente si adatta ai criteri scelti è il sistema "Continuo modulare realizzato attraverso pannelli vegetali".

Nella seconda parte del capitolo si precisano le principali caratteristiche del sistema e si descrive la prova di laboratorio realizzata per determinare la conducibilità termica del substrato, che assume valori differenti in base alla presenza o meno di acqua in esso contenuta: si determina un valore di 0.09 W/(mK) per substrato secco e di 0.19 W/(mK) per il substrato umido.

Tras analizar y clasificar los sistemas de fachada vegetal presentes en la actualidad, en este capítulo procedo a seleccionar el sistema más adecuado para el estudio experimental. El criterio de selección se basa en la comparación de los diferentes sistemas, considerando las características analizadas

en las fichas del capítulo anterior “Clasificación de las fachadas vegetales existentes”. Una vez elegido el modelo de fachada más apropiado para el estudio experimental, continuó describiendo sus principales componentes y los ensayos de laboratorio realizados.

5.1. Criterios de selección

Tal y como se ha comentado, los criterios de selección que se analizan a continuación son funcionales, basados en los aspectos más relevantes desarrollados a lo largo del capítulo anterior, a fin de elegir el sistema más apropiado para el estudio experimental. Estos criterios se establecen tras un análisis escrupuloso de las características necesarias para facilitar la aplicación de las fachadas vegetales en los edificios actuales. Por tanto, el objetivo es elegir un sistema de fachada con los requisitos necesarios que permitan encuadrarlo dentro del proceso general de optimización de la producción de edificios, entendido como un acto global que incluye desde la redacción del proyecto hasta la finalización de su ejecución, pasando por la fabricación de materiales y componentes, tanto constructivos como de instalaciones. Así, los criterios de selección que más se han tenido en consideración han sido el alto grado de industrialización del sistema, su ligereza y su facilidad de montaje y mantenimiento, características imprescindibles para que el sistema sea aplicable a gran escala. Otro aspecto fundamental en la elección del sistema ha sido la eficacia energética del mismo. Según se han entendido en este trabajo las fachadas vegetales, más allá de su valor estético, se pueden considerar como estrategias bioclimáticas pasivas. Gracias a estas estrategias, es posible

proyectar edificios que tengan en cuenta las condiciones climáticas locales y aprovechen los recursos disponibles, con el fin último de reducir el consumo energético sin ser en detrimento del máximo nivel de confort para el bienestar del usuario. La sostenibilidad del sistema ha sido el tercer aspecto que se ha contemplado. Siendo consciente de que una evaluación completa del impacto ambiental del sistema sólo puede ser obtenida a través de un análisis de ciclo de vida del mismo y no siendo éste objeto de la tesis, la sostenibilidad se ha evaluado a través de tres aspectos fundamentales: el coste económico, la reutilizabilidad del sistema y el consumo de agua. Aun representando estos tres aspectos una visión muy parcial del concepto de sostenibilidad, la evaluación comparativa de los mismos permite realizar una primera valoración.

5.1.1. Industrialización

Se entiende por industrialización la producción industrial de elementos constructivos junto con un proceso racionalizado y eficiente de ejecución en obra basado en la utilización de técnicas industriales que faciliten las operaciones y reduzcan la incidencia de mano de obra. Esto es posible gracias a la incorporación de elementos modulares que facilitan el montaje de los sistemas utilizados con elementos de catálogo. En la evaluación del grado de industrialización de los diferentes modelos de fachada se ha tenido en cuenta el sistema en su totalidad, considerando tanto la parte vegetal como la parte estructural. Por lo que respecta a estas características, los sistemas analizados pueden dividirse en tres grupos:

- Sistemas que se basan en el crecimiento *in situ* de las plantas, cuyo

grado de industrialización es nulo o bajo, dependiendo del sistema de soporte y anclaje (en caso de existir).

- Sistemas caracterizados por un alto grado de industrialización, compuestos por diferentes elementos donde, en la mayoría de los casos, el soporte de la vegetación llega a obra listo para ser montado en el edificio a falta de ser completado con la vegetación. Según el caso, el sistema puede estar concebido para que la vegetación se desarrolle *in situ* o para que sea incorporada una vez desarrollada en vivero.
- Sistemas compuestos por paneles pre-cultivados, cuyo grado de industrialización es total.

5.1.2. Montaje

Por montaje de un sistema vegetal de fachada se entiende el proceso de completa puesta en obra del sistema, que engloba tanto la estructura de soporte de la vegetación (en caso de existir) hasta la incorporación de las plantas. El procedimiento de montaje varía en gran medida dependiendo del sistema de fachada, pudiendo ser desde muy sencillo hasta complejo. Esto depende principalmente de cómo haya sido concebida la integración del sistema en el edificio. En algunos casos la incorporación del sistema en el edificio tiene que estar pensada y resuelta desde el principio y, por lo tanto, el elemento de soporte de la vegetación es parte integrante del edificio y no necesita ningún tipo de montaje adicional. En otros casos la vegetación crece sin necesidad de soporte alguno, como es el caso del grupo de fachadas clasificadas como “continua sin soporte”. En ambos casos el montaje del sistema ha sido cla-

sificado como sencillo. También se caracteriza por su sencillez de montaje el sistema modular en caja, pensado para que su instalación y reposición sean fáciles y rápidas. De hecho, el peso de los módulos permite que cada uno pueda ser transportado por una sola persona. Además, la modularidad del sistema permite, en este caso, que la reposición de una o más piezas pueda realizarse sin necesidad de desmontar la fachada entera. Los sistemas cuyo montaje ha sido clasificado como complejo, pertenecen básicamente a dos grupos:

- Fachadas que incorporan elementos vegetales en su interior cuya construcción se realiza totalmente en obra, como es el caso de las fachadas realizadas con gaviones.
- Fachadas que proporcionan un recubrimiento continuo de fachada, cuyos sistemas de soporte para el crecimiento de la vegetación requieren un montaje realizado por personal especializado.

El resto de sistemas precisa un montaje cuyo grado de dificultad puede ser definido como intermedio, pudiendo llevarse a cabo sin necesidad de personal especializado.

5.1.3. Mantenimiento

El mantenimiento de una fachada vegetal se refiere a todas las acciones necesarias para mantener tanto el sistema de soporte como la vegetación en buen estado, para que pueda llevar a cabo la función por la que el sistema ha sido propuesto, al mismo tiempo que se logre mantener un aspecto estéticamente agradable. Todas las fachadas vegetales, por el simple hecho

de estar constituidas por vegetación, elementos vivos por tanto que crecen, se desarrollan y pueden enfermar o secar, requieren un mantenimiento adicional que las fachadas convencionales carecen. De hecho, el mantenimiento de las fachadas vegetales se encuentra intrínsecamente relacionado con el tipo de vegetación utilizado y la correcta evacuación de las aguas sobrantes. Tanto el sistema de soporte como el tipo de vegetación condicionan el tipo de trabajo para la buena conservación del mismo y la frecuencia con que se realice. En esta investigación, el tipo de mantenimiento ha sido clasificado en base a la frecuencia con la que debe llevarse a cabo, siendo el tipo de mantenimiento específico para cada sistema. La frecuencia del mantenimiento se ha dividido en periódica o frecuente. La mayoría de los sistemas requiere un mantenimiento periódico que, en general, tendrá que realizarse entre dos y cuatro veces al año, dependiendo considerablemente de las especies utilizadas. Durante el mantenimiento se controlará, por una parte, la aparición de plantas adventicias, las necesidades de riego y el crecimiento de la vegetación en zonas no deseadas; por otro lado, se realizará un control riguroso del estado del sistema de riego y desagüe. En algunos casos será necesario incluir las podas y recortes de la vegetación. Algunos sistemas por ser muy sofisticados o por utilizar especies vegetales peculiares, como es el caso de las plantas tropicales, necesitan un mantenimiento frecuente, que puede llegar a ser hasta de una vez al mes.

5.1.4. Efectividad energética

Una de las principales ventajas de las fachadas vegetales es la reducción de las cargas de refrigeración en los edificios. Este efecto es debido a la bajada de temperatura en la superficie exterior de la fachada que, a su vez, es consecuencia del sombreado proporcionado por las hojas y de la evapotranspiración. Esta última es altamente dependiente de la disponibilidad de agua en el sustrato durante las horas de estrés térmico. Tanto la presencia de sustrato como la disponibilidad de agua son factores de gran importancia para la optimización de la efectividad energética de los sistemas. Los sistemas de fachada vegetal presentes en la actualidad pueden ser divididos en tres grupos:

- Sistemas en los que la presencia de vegetación tiene principalmente un fin decorativo, como es el caso del sistema de “contenedores integrados en fachada”, cuya efectividad energética es nula.
- Sistemas que se basan en una gran densidad de vegetación que funcionan como pantalla vegetal y proporcionan sombreado a las fachadas. La mayoría de estos sistemas puede ser utilizada tanto en fachadas opacas como en fachadas translúcidas. Su efectividad energética ha sido clasificada como media o baja, dependiendo del grado de densidad de la vegetación. Este es el caso de los sistemas “continuos” o de los sistemas realizados con elementos puntuales, como los “contenedores simples” o los “contenedores apilados”.
- Sistemas modulares, utilizados exclusivamente en fachadas opacas, en

los que la estructura del sistema ya incorpora el sustrato para el crecimiento de las plantas. Debido a estas características, estos sistemas tienen una alta eficacia energética. Dentro de ellos, el sistema “continuo modular en caja” es el único sistema eficiente desde el momento de la puesta en obra, ya que cuenta con paneles pre-cultivados. Los otros sistemas alcanzan su nivel máximo de eficiencia una vez que la vegetación se ha desarrollado por completo.

5.1.5. Peso

El peso y el sistema de sujeción de la fachada vegetal han de tenerse en consideración siempre a la hora de realizar este tipo de soluciones vegetales. La primera distinción que hay que hacer es ver si la estructura que sujeta la vegetación es independiente o no de la fachada del edificio, a fin de establecer si el peso del sistema vegetal carga o no en la estructura del edificio. Una vez tomada esta decisión, hay que tener en cuenta que el peso de cada sistema depende de muchos factores, entre otros:

- la densidad de vegetación;
- la presencia o ausencia de sustrato;
- la cantidad y la capacidad de sustrato de retener el agua de riego;
- el tipo de soporte estructural necesario para el crecimiento de la vegetación.

Por otro lado, resulta inviable determinar a priori el peso real de los sistemas de fachada vegetal, al estar condicionados por los factores mencionados.

Además, aun conociendo el peso aproximado del sistema a través de la información proporcionada por los comercializadores, el peso puede seguir variando según las características del edificio en que se vaya a instalar la fachada vegetal. En el caso de los sistemas con plantas trepadoras, el peso de las enredaderas generalmente puede variar entre 1 y 50 kg/m², según la especie y el crecimiento. A este peso luego se añade el propio de la estructura de soporte, si no es independiente del edificio. En los sistemas que prevén la presencia de macetas, el peso además de depender del tipo y de la densidad de vegetación, depende de la tipología de maceta y de la cantidad de sustrato contenido en ella. En los sistemas modulares, el peso puede variar mucho, dependiendo sobre todo del tipo de soporte. Dentro de este grupo, los “sistemas modulares en caja ” resultan ser los más ligeros de todos, debido tanto a la ligereza de la caja como al tipo de sustrato aligerado que se suele utilizar, variando el peso del sistema entre 20 y 40 kg/m². Por otro lado, cabe destacar que el peso de estos sistemas carga sobre la estructura del edificio, mientras que tanto los sistemas en “bloque” como los sistemas de “gaviones ” se comportan tanto como elementos de soporte de la vegetación como elementos estructurales del edificio.

5.1.6. Riego

Una correcta irrigación es necesaria para asegurar la densidad adecuada de vegetación y, por lo tanto, las funciones previstas dentro del proyecto bioclimático. El riego, preciso sobre todo durante la estación estival, puede ser automático o manual. Los actuales sistemas de fachadas vegetales dispo-

nen de sistemas de riego automático, capaces de asegurar un abastecimiento adecuado de agua, de acuerdo con las necesidades diarias, semanales o mensuales. El sistema de riego automatizado es indispensable en el caso en el que las plantas se coloquen en altura, puesto que la accesibilidad a las mismas sería limitada. Los tiempos y frecuencias de riego deben ser determinados en función del tipo de planta, del sustrato y de la estación. Los programas de riego diferenciado son necesarios cuando se pretende utilizar una variedad mayor de plantas, ya que no todas necesitan el mismo suministro de agua. Incluso la exposición a la lluvia es un factor a tener en cuenta al establecer la frecuencia de riego. El consumo de agua se asocia principalmente a tres factores:

- el tipo de planta elegido y las consecuentes necesidades de agua;
- la posibilidad de re-ciclo del agua a través de un sistema cerrado;
- la posibilidad de utilizar el agua de lluvia recolectada.

La posibilidad del re-ciclo de agua o de la utilización de agua de lluvia no depende mucho del sistema de fachada, depende más bien de las instalaciones previstas en el edificio en el que se implemente la fachada. Ciertamente es que algunos tipos de fachada ya incorporan un sistema de riego con re-ciclo de agua que facilita la correcta instalación del sistema en el edificio. Este es el caso de algunos “sistemas modulares en caja” o de algunos sistemas realizados con macetas. Por otro lado, hay que destacar que los sistemas que prevén la utilización de plantas tropicales, como es el caso de las fachadas “continuas con soporte adherido a la pared”, conllevan un consumo de agua muy superior a otros sistemas, debido a las propias necesidades de la planta.

5.1.7. Coste económico

La realización de una fachada vegetal implica costes relacionados con la construcción del sistema y el mantenimiento del mismo con el transcurso del tiempo. El coste puede variar mucho entre un sistema y otro y, en la mayoría de los casos, depende principalmente de:

- coste de la vegetación y su plantación
- coste del sistema de riego
- coste de las estructuras de soporte y de su colocación
- coste de mantenimiento

Aunque en los últimos años haya habido una gran difusión de sistemas vegetales, el coste de la mayoría de ellos sigue siendo bastante elevado. En general, la implantación de una fachada vegetal en un edificio, implica un coste adicional relevante. Para estimar el coste medio de cada uno de los sistemas analizados sería necesario realizar un exhaustivo estudio de mercado sobre las empresas que los comercializan y así calcular el coste medio. Por otro lado, ese coste medio tampoco resultaría ser muy representativo, ya que muchos sistemas semejantes pueden llegar a tener diferencias de precio relevantes. De hecho, un mismo sistema de fachada puede ser realizado con materiales y tecnologías diferentes, reflejándose en el coste final del sistema. En línea general, se puede afirmar que los sistemas más baratos son los que utilizan plantas trepadoras, los cuales no requieren ningún tipo de soporte específico para la vegetación. También algunos sistemas puntuales realizados

con macetas pueden tener un coste limitado, disponiendo algunos casos de macetas convencionales. Los sistemas más caros son, sin ninguna duda, los sistemas “continuos con soporte adherido a la pared”. Se trata de sistemas muy sofisticados en los que influye sobre todo el precio de las plantas tropicales y los elevados costes de mantenimiento, riego y sustitución de las plantas. Otros sistemas costosos son los sistemas continuos realizados con estructuras metálicas independientes del propio edificio, que pueden ser verticales o una combinación de verticales y horizontales. En estos casos es el coste de la estructura de soporte lo que conlleva que el precio se eleve. Los sistemas modulares tienen un coste medio, aunque su variabilidad depende mucho de la empresa que comercializa el producto y del sistema de construcción de la fachada. Para los sistemas “continuos modulares en caja” se puede decir que su coste, en la mayoría de los casos, es comparable con el de una fachada ventilada, transformando este sistema en una alternativa interesante a la fachada ventilada.

5.1.8. Reutilizabilidad

Por reutilizabilidad de un sistema se entiende la posibilidad de volver a utilizarlo en su mismo estado inicial, sin tener que volver a procesar los materiales. Un sistema de fachada vegetal reutilizable en su totalidad o en parte, puede ser reutilizado en la misma obra donde se ha desmontado o en otra, cuyas características permitan el empleo del mismo sistema. Algunos sistemas no se pueden reutilizar debido a sus características y a su vinculación con el proyecto. Este es el caso, por ejemplo, de los sistemas de plantas

trepadoras, de los sistemas realizados con macetas (tanto continuos como puntuales) donde estos elementos forman parte de la misma estructura del edificio o de los sistemas modulares con gaviones y bloques, que son a la vez soporte para la vegetación y estructura del edificio. Sin embargo, otros sistemas, como los continuos con soporte vertical, se caracterizan por un nivel de reutilización intermedio, ya que sólo la parte estructural del sistema puede ser desmontada y utilizada en otro proyecto. Por otro lado, existen sistemas con un alto nivel de reutilizabilidad, como los sistemas con macetas apiladas utilizados habitualmente como huertos urbanos o los sistemas modulares en caja, ya que son completamente ensamblados en seco permitiendo el rápido desmontaje tanto de la estructura de soporte como de los paneles vegetales, sin ningún tipo de alteración de la vegetación.

5.2. Diseño de la fachada

Una vez analizados todos los criterios de selección y comparados los sistemas, se puede concluir que el sistema que más se adapta a todos los criterios preestablecidos es el sistema “continuo modular en caja”. Este sistema se caracteriza por ser industrializado, siendo el transporte, el montaje, el mantenimiento y la sustitución sencillos. Se trata de un sistema que, al contener sustrato y vegetación, proporciona mayores ventajas energéticas respecto a otros sistemas. Además, al tratarse de paneles prevegetados es eficiente desde el principio. Desde el punto de vista del ciclo del agua, es sostenible porque cuenta con un sistema de recuperación del agua de riego. Su reutilizabilidad es alta, dado que se trata de un sistema completamente ensamblado en

seco, cuyas características permiten que sea desmontado y vuelto a montar en otro edificio sin que la vegetación sufra ningún tipo de alteración. Existen varias empresas que fabrican sistemas con elementos modulares en caja. Dentro de ellas, se consideró colaborar con la empresa Intemper, ya que desde años colabora en proyectos de investigación con la Universidad Politécnica de Madrid. En este marco de colaboración nace el proyecto CECOS, proyecto centrado en la monitorización de un sistema de fachada vegetal constituido por elementos modulares en caja. Los elementos modulares son paneles de chapa perforada (0.6 m x 0.6 m x 0.08 m) que contienen el sustrato y pueden presentarse con o sin una base de poliestireno extruido. Estos elementos se fijan a un cerramiento existente a través de perfiles e incluyen un sistema de riego automatizado.

5.2.1. Vegetación

Acerca de la elección del tipo de planta a emplear, es fundamental que se consideren especies que se adapten a la zona climática propia del lugar donde se instale el sistema, ya que al encontrarse a la intemperie es esencial que las especies toleren las inclemencias del tiempo. También es de vital importancia el hecho de que requieran poco mantenimiento en cuanto a riego y poda, además de ser especies vegetales que no tengan que estar resemebrándose. Las especies tienen que ser apropiadas para un desarrollo en vertical, ya que los paneles se pre-cultivan en horizontal en vivero. La elección del tipo de especie va a depender del lugar en donde se encuentre emplazado el edificio donde se instale este tipo de cerramiento. En función de la orientación del

edificio y de la exposición de sus fachadas (sombra, pleno sol, semi-sombra) se seleccionará la vegetación más adecuada que se adapte a los requisitos planteados. Las especies han de ser de tipo perenne, pudiendo elegir aquellas que tengan floración de colores diversos o especies que aseguren muros verdes durante todo el año. Las posibilidades de combinar las especies vegetales son múltiples, permitiendo así la creación de una gran diversidad de cerramientos únicos, siendo rico en formas y en colores, capaz de responder eficientemente a las condiciones medioambientales y promover el ahorro energético en las edificaciones. Estos paneles no sólo resultan ser una solución para un cerramiento de fachada, sino que también suponen una mejora estética en edificaciones ya construidas por el efecto visual que la composición vegetal aporta. Las plantas seleccionadas son tipo *Sedum* y de poco mantenimiento. Se caracterizan por sobrevivir con poco agua y favorecerles una escasez de materia orgánica, al evitar así la aparición de competidores. Las especies de *Sedum* tienen, en general, un crecimiento lento, por lo que deben plantarse a densidades altas. El *Sedum acre* florece en primavera con flores estrelladas de cinco pétalos de color amarillo vivo, el riego es escaso pero más abundante durante el período estival. Se puede reproducir por semillas en primavera o esquejes en verano. Su disponibilidad en viveros es alta. El *Sedum sediforme* se reproduce mediante esquejes de hoja o de tallo en verano y el riego es escaso. El *Sedum rupestre* se desarrolla en fachadas expuestas en semisombra, su disponibilidad en viveros es alta, es una planta muy resistente y se multiplica por semillas o por esquejes de tallo desde primavera hasta verano. El *Sedum sexangulare* se desarrolla en semisombra, florece en primavera mediante flores amarillas, se reproduce por semillas o por esquejes. También se pueden

utilizar plantas tapizantes de muros, de crecimiento rápido y desarrollo máximo pequeño: *Ajuga Reptans* (Bújula), *Cheiranthus cheiri* (Alhelí amarillo), *Asteriscus maritimus* (Estrella de mar), *Cerastium Tomentosum* (Canastilla de plata).

5.2.2. Sustrato

El sustrato es el elemento fundamental para la subsistencia de la vegetación, siendo la fuente de alimento y albergue de las raíces. El sustrato utilizado en este caso está compuesto por:

- fibra de coco (aproximadamente 70 %);
- poliestireno expandido en bolitas (aproximadamente 30 %);
- una parte residual de abono de liberación lenta de 9 meses en bolitas.

5.2.3. Caja y fieltro

Las especies vegetales requieren un elemento de soporte que tenga en su interior los nutrientes y elementos necesarios que propicien su crecimiento. Es por esta razón que se emplea una caja metálica de chapa perforada, en cuyo interior el sustrato se encuentra envuelto en un geotextil que permite el paso del agua pero evita la pérdida del mismo. El geotextil citado es un fieltro sintético de poliéster de 0.015 m de espesor. La caja tiene que tener un tratamiento anticorrosivo, debido a la exposición a la humedad generada por la evaporación del agua por parte de las plantas como por parte del mismo riego. El tratamiento puede ser acero galvanizado, ya que el zinc protege los

paneles de acero de la exposición a ambientes agresivos como pueden ser los mismos núcleos urbanos. Las dimensiones estándar de la caja son (0.6 m x 0.6 m x 0.08 m), existiendo la posibilidad de producir cajas con dimensiones distintas. El espesor de la lámina de acero es 0.001 m.

5.2.4. Estructura de anclaje

El vínculo entre los paneles vegetales y el edificio se realiza mediante una estructura portante de montantes y travesaños. Los montantes son una estructura vertical de acero galvanizado que actúa como elemento de soporte principal donde se disponen los módulos. En la parte posterior del panel vegetal se colocan unos anclajes que se enganchan a una estructura horizontal secundaria dispuesta sobre la perfilería vertical. Las uniones tienen capacidad para soportar las fuerzas del viento y de posibles impactos. Esta estructura permite desinstalar los paneles vegetados del conjunto del cerramiento. Por detrás de los paneles, se puede disponer una capa de aislamiento que, además de conferir una mayor resistencia térmica, evita los puentes térmicos.

5.2.5. Sistema de riego

El sistema de irrigación es automático mediante conductos de goteo e incorpora jardineras aljibe a pie de fachada que permiten re-circular el agua de riego. El riego por goteo consiste en aplicar pequeñas cantidades de agua en zonas localizadas como las raíces de las plantas. Los componentes son tuberías de 0.016 m que van ubicadas en la parte superior de cada panel vegetal. El sistema se complementa con elementos de filtrado, control de

riego y una bomba para que el agua pueda elevarse los metros de altura que tenga la edificación donde se coloque este sistema. Se ahorra entre un 50 % y un 60 % de agua con respecto a los sistemas de riego tradicionales. Además, sus propiedades no se ven alteradas por factores como las altas o bajas temperaturas, los rayos ultravioletas o los impactos. Para re-circular el agua de riego, se utiliza una bomba sumergible con poca potencia que retorne al depósito con una presión determinada, ya que el agua debe alcanzar varios metros de altura en determinadas edificaciones.

5.3. Determinación de la resistencia térmica del sustrato mediante ensayos de laboratorio

Una vez definidos los materiales que componen el panel vegetal, se procede a realizar los ensayos necesarios para determinar la conductividad térmica del sustrato. Los ensayos se realizan en el laboratorio CEIS (Centro de ensayo, innovación y servicios) de Móstoles (Madrid) siguiendo la norma UNE-EN 12667:2002 “Materiales de construcción. Determinación de la resistencia térmica por el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. Productos de alta y media resistencia térmica”. Dentro de la norma de ensayo se recogen dos posible métodos igualmente válidos: el método de la placa caliente guardada y el método del medidor de flujo de calor. El primer método es absoluto y el segundo es relativo, es decir, está basado en una calibración previa del equipo realizada con un material

cuya conductividad térmica es conocida y está certificada. El método más implantado actualmente es el método del equipo medidor de flujo de calor debido fundamentalmente a la rapidez con la que se realizan las medidas. Dentro de este método existen tres posibles variantes del equipo a utilizar: simétrico de una muestra, simétrico de dos muestras y asimétrico de una muestra. Existen también equipos dobles, siendo posible en todas estas variantes tanto la orientación vertical como la horizontal. En este ensayo se ha utilizado un equipo medidor de flujo de calor simétrico de una única muestra con orientación horizontal. La figura muestra este tipo de equipo: El equipo consta de dos placas, una móvil y otra fija, que a la hora de realizar un ensayo deben estar en perfecto contacto con las caras principales del material a ensayar. En la zona central de cada placa, la zona de medida, se encuentra embebido un medidor de flujo de calor, el cual está provisto de miles de pequeños termopares. La señal media de cada medidor de flujo de calor es proporcional al flujo de calor a través de la probeta. Esta señal es la que se emplea para determinar la conductividad térmica de la muestra. El ensayo en sí es un experimento físico muy sencillo y consiste en aplicar un gradiente de temperatura, programando las placas a diferentes temperaturas para que se produzca un flujo de calor a través de la muestra. La diferencia de temperatura se calcula como diferencia entre las temperaturas medidas en el centro de cada placa. Para poder determinar con exactitud la conductividad térmica del material, el sistema debe estar en estado estacionario. Para ello, se han de cumplir los siguientes criterios de equilibrio:

- criterio de temperatura: la temperatura de las placas debe ser estable;

- criterio en la señal de salida de los medidores de flujo de calor: la señal de los medidores de calor no debe variar;
- criterio de inflexibilidad: la señal media de los medidores de flujo de calor en los diferentes bloques de medidas que toma el equipo no debe variar monótonamente, es decir, la diferencia entre dos bloques sucesivos debe cambiar de signo o ser igual a cero.

De esta manera es posible determinar la conductividad térmica en el estado estacionario del material empleando la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{\Delta T} = \frac{\lambda}{e} = \frac{1}{R} \quad (5.1)$$

donde:

dQ : flujo de calor, obtenido a partir de las constantes de calibración de los medidores de flujo de calor y de la señal eléctrica que proporcionan (W/m²)

ΔT : diferencia de temperatura establecida entre los dos lados de la muestra (en K)

λ : conductividad térmica de la muestra (W/mK)

e : espesor de la muestra (m)

R : resistencia térmica de la muestra (m² K/W)

Durante el ensayo, se analizan dos muestras y se determinan los respectivos valores de conductividad térmica. Una de las muestras está compuesta

por sustrato seco y la otra contiene sustrato en *capacidad de campo*, es decir, contiene la cantidad de agua que es capaz de retener el suelo después de haber sido mojado abundantemente).

En ambos casos, las muestras presentan la misma dimensión, 0.6 m x 0.6 m x 0.08 m. La temperatura ambiente del lugar que rodea al equipo durante el ensayo se sitúa en $23\pm 2^\circ\text{C}$. En el equipo, la muestra está montada horizontalmente con flujo ascendente. La posición del lado caliente de la muestra es la inferior. Se acondicionaron las muestras antes del ensayo para mantener una masa constante a $23\pm 2^\circ\text{C}$ y $50\%\pm 5\%$ de humedad relativa, realizando pesadas sucesivas a intervalos de 24 horas, hasta conseguir el peso constante. Se determina un valor de conductividad térmica de $0.09\text{ W}/(\text{m K})$ para el sustrato seco y $0.19\text{ W}/(\text{m K})$ para el sustrato húmedo.

En el cuadro 5.1 se resumen los valores de espesor, conductividad térmica y resistencia térmica de los materiales que componen el panel vegetal. Se puede notar cómo la resistencia térmica del sustrato varía notablemente según esté seco o húmedo.

5.4. Conclusiones sobre la selección del sistema

A partir del análisis y la comparación de los diferentes sistemas existentes en la actualidad a través de los criterios de selección elegidos (industrialización, montaje, mantenimiento, efectividad energética, peso, riego, coste económico y reutilizabilidad), el sistema más adecuado para el estudio expe-

Cuadro 5.1: Principales características de los materiales que componen el panel.

Panel vegetal			
	e [m]	λ [W/(m K)]	R [m ² K/W]
Acero galvanizado	0.0010	50	0.006
Fieltro (poliéster)	0.0015	0.250	0.006
Sustrato (seco)	0.0800	0.090	0.870
Sustrato (húmedo)	0.0800	0.190	0.420

rimental ha resultado ser el “sistema continuo modular en caja”, por ser el que mejor se adapta a los criterios de selección. Desde el punto de vista del ciclo de agua, la solución resulta ser sostenible, ya que incorpora un sistema de recuperación del agua de riego, así como, un alto grado de reutilizabilidad. Se trata de un sistema industrializado que se ensambla en seco en su totalidad, pudiendo ser desmontado e instalado en otro edificio sin afectar a la vegetación. Precisamente el grado de industrialización influye directamente en que las operaciones de transporte, montaje, mantenimiento y sustitución resulten sencillas. En cuanto al grado de eficiencia, el sistema está formado por paneles prevegetados que permiten que sea eficiente desde su instalación en fachada. Frente a otros sistemas, el elegido proporciona mayores ventajas energéticas por incorporar vegetación y sustrato. Como fabricante de este tipo de sistema de fachada vegetal con elementos modulares en caja, se elige a la empresa Intemper Española S.A. debido a su larga trayectoria de colaboración en proyectos de investigación de la Universidad Politécnica de

Madrid. El proyecto CECOS surge en este contexto, proyecto basado en la monitorización de un sistema de fachada vegetal con elementos modulares en caja. Este sistema está formado por paneles de chapa perforada de acero galvanizado (0.6 m x 0.6 m x 0.08 m). Estos elementos modulares contienen el sustrato y se fijan en fachada por medio de una estructura portante de montantes y travesaños. Además de riego automatizado, el sistema incorpora jardineras aljibe a pie de fachada que sirve para re-circular el agua de riego.

Los ensayos de laboratorio para la determinación de la conductividad térmica del sustrato han demostrado que hay una diferencia importante entre el sustrato seco y el sustrato húmedo. Este último se ha ensayado en capacidad de campo (contenido de agua que es capaz de retener el suelo después de haber sido mojado abundantemente). Se determina un valor de conductividad térmica de $0.09 \text{ W}/(\text{m K})$ para el sustrato seco y de $0.19 \text{ W}/(\text{m K})$ para el sustrato húmedo. Aunque el sistema de fachada ha resultado ser el más adecuado para el estudio experimental, de cara a su aplicación a gran escala en los edificios actuales se debería trabajar en abaratar el coste y reducir el peso.

Capítulo 6

Prototipo experimental

Prototipo sperimentale *In questo capitolo si descrivono i moduli sperimentali in scala reale costruiti come parte di un edificio per uffici dell'azienda Intemper nella località di Colmenar Viejo, cittadina situata nella Sierra di Guadarrama a 40 km a nord di Madrid.*

Il prototipo è costituito da quattro spazi identici in dimensioni (1.8m x 1.8m x 2.4m) e composizione dei serramenti, e che differiscono solo per il serramento corrispondente al lato sud. Questa ricerca si concentra sull'analisi e sul confronto dei dati termici ottenuti mediante il monitoraggio di due delle quattro pareti sud esistenti nel prototipo. Entrambe le facciate sono realizzate con il sistema di pannelli modulari prevegetati descritto nel capitolo precedente: l'unica differenza tra i due è che in un caso lo strato esterno della facciata è costituito da vegetazione. Lo studio si basa quindi sul confronto dei dati ottenuti dai due moduli, uno con vegetazione e l'altro privo di essa.

Durante il monitoraggio, oltre ai dati climatici, si registrano la temperatu-

ra dell'aria all'interno dei moduli, le temperature superficiali e i flussi termici che attraversano le facciate esposte a sud. Il monitoraggio viene effettuato in due fasi: la prima dal gennaio del 2009 al novembre del 2011, e la seconda durante l'estate del 2012. Diversamente dalla prima fase, nella seconda fase di monitoraggio si inseriscono nella superficie interna di entrambe le facciate esposte a sud un pannello di polistirene estruso di 0.07 m di spessore.

6.1. Localización de las fachadas

La monitorización se lleva a cabo en un edificio experimental a escala real en Colmenar Viejo 40.39° N, 3.45° W, una localidad a 40 km al norte de Madrid, en la sierra de Guadarrama. En el verano de 2008, se construye el prototipo experimental como parte integrante de un edificio de oficinas de la empresa Intemper situado en uno de los polígonos industriales de Colmenar Viejo.

La monitorización se desarrolla en dos fases: la primera, de enero de 2009 a noviembre de 2011, y la segunda, durante el verano de 2012. La descripción detallada de las fases de monitorización se incluye en la sección 6.7.

El edificio es de planta rectangular y consta de tres alturas. Las dos primeras son iguales en dimensión (13.8 m x 32.5 m), mientras que la tercera (13.8 m x 28.9 m) presenta una terraza orientada a sur donde se instala el prototipo experimental como parte integrante de la fachada (figura ??).

Tanto en verano como en invierno, la fachada está completamente soleada, ya que la parcela cuenta con un amplio espacio libre en la parte delantera y las construcciones más próximas se encuentran a distancia suficiente como para evitar sombras arrojadas.



Figura 6.1: Fachada sud del edificio de oficinas de la empresa Intemper donde se han incorporado los prototipos experimentales.

6.2. Descripción del prototipo

El prototipo consta de cuatro espacios idénticos en dimensión (1.8 m x 1.8 m x 2.4 m) y composición de cerramiento, tan sólo difiriendo en el cerramiento correspondiente a la fachada sur (figura 6.2).

Los cuatros espacios se encuentran completamente aislados entre sí, ya que uno de los objetivos de diseño era conseguir crear espacios prácticamente adiabáticos, de tal modo que todas las transferencias de calor se produjeran única y exclusivamente por la fachada.

Por este motivo, se incorporó una capa de 0.6 m de poliestireno extruido ($\lambda = 0.035 \text{ W}/(\text{m K})$) en suelo, techo y paredes de cada ambiente, consiguiendo una resistencia térmica total de $17.8 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$ para las capas de separación y $17.2 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$ para suelo y techo.

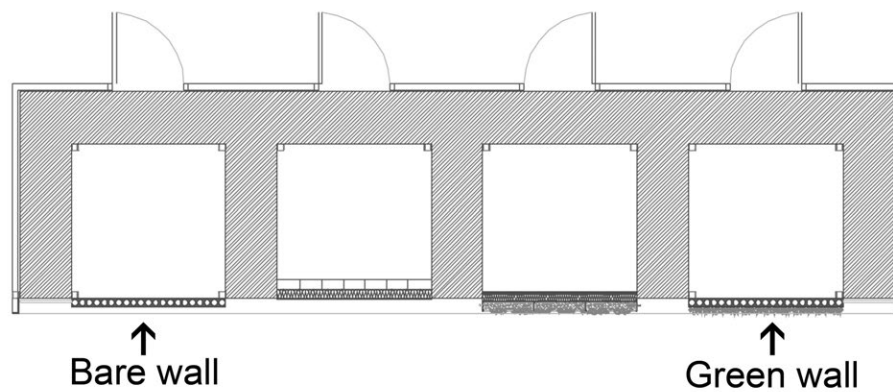


Figura 6.2: Esquema en planta del prototipo experimental.

Esta investigación se centra en el análisis y la comparación de los datos térmicos obtenidos a través de la monitorización de dos de las cuatro fachadas existentes en el prototipo.

Ambos cerramientos están constituidos por paneles modulares que incluyen los siguientes componentes: caja metálica ($0.6 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.08 \text{ m}$) conteniendo el sustrato, estructura de anclaje y soporte vertical. El acabado exterior de uno de los paneles corresponde a una capa de vegetación de se-

dum. Para mantener el substrato húmedo, se incorpora un sistema de riego por goteo en el cerramiento con acabado vegetal.

6.3. Descripción de los sensores y del sistema de adquisición de datos

Las fachadas están monitorizadas de forma que se puedan obtener y registrar los datos de temperatura que existan en cada una de las capas del cerramiento de los módulos, desde el exterior hasta el interior, mediante sensores fijos.

En ambas fachadas se colocan dos sensores de superficie, uno entre la chapa y la capa de fieltro del panel y otro, detrás del panel, en la superficie interior.

En el interior de los módulos se instalan dos sensores de temperatura ambiente localizados en la zona central, cerca del suelo y techo (figura 6.3).

Los datos térmicos obtenidos en las fachadas y analizados en este trabajo son:

- temperatura superficial de la chapa metálica al exterior (T_{se});
- temperatura superficial de la chapa metálica al interior (T_{sb});
- temperatura del aire cerca del techo (T_c);
- temperatura del aire cerca del suelo (T_f).

Los datos tomados en la fachada con vegetación se comparan con los datos tomados en la fachada sin vegetación. Por cada sonda se toman valores cada

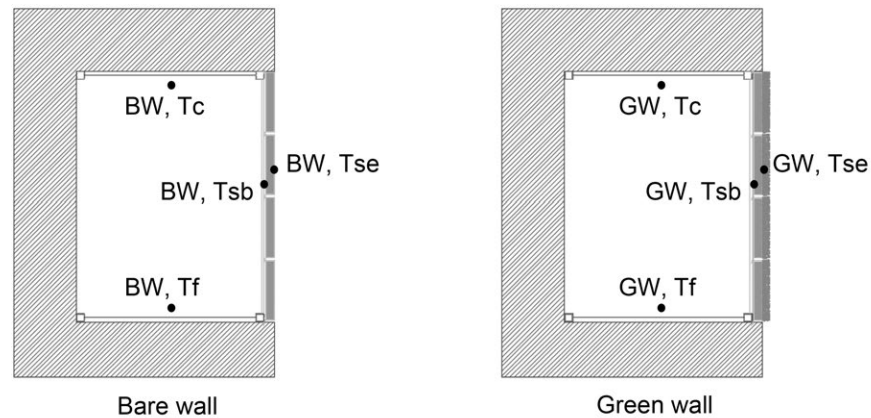


Figura 6.3: Esquema en sección de los módulos experimentales y posición de los sensores de temperatura durante la primera fase de monitorización.

5 minutos. Los valores se van anotando en una hoja de cálculo, con indicación de fecha y hora. Mediante el programa utilizado, se pueden representar gráficamente los valores instantáneos. La gráfica puede comprender la conjunción de las sondas que se desean representar en cada momento, así como la elección del periodo de tiempo.

El programa que registra los datos es de tipo Scada, instalado en un pc convencional.

El equipo que transforma la señal analógica de las sondas en un valor de temperatura es un Autómata programable tipo M-340 de Schneider.

Para asegurar que las fachadas testigo tengan siempre vegetación desarrollada, se dispone de módulos de repuesto con cantidad suficiente de plantas que permitan la sustitución de los módulos en caso de pérdida de vegetación.

Para obtener el valor de la temperatura superficial de cada componente

del cerramiento se utilizan sensores de temperatura tipo termo-resistentes PT-100 planas de 63 mm x 8 mm x 2 mm a 3 hilos y para el valor de la temperatura ambiente en cada lugar, sensores de temperatura tipo termo-resistentes PT-100 L=100 mm de 6 mm de diámetro AISI-316 a 4 hilos.

Los sensores se duplican a fin de comprobar el grado de fiabilidad de los datos registrados en todos los casos. Esta duplicidad evita posibles reinstalaciones en caso de fallos en los sensores, por rotura u otras causas.

Para el resto de datos (radiación solar, pluviometría, velocidad del viento en el ambiente exterior, humedad relativa en el ambiente exterior) se emplean los aportados por la estación meteorológica, instalada en otro edificio experimental a menos de 100 m de distancia de las fachadas.

La precisión de las sondas es de ± 0.15 K para las termoresistencias y para las termohigrómetros, ± 0.2 K y ± 2 %.

6.4. Fases de monitorización

Tal y como se indica en la sección 6.1, la monitorización se lleva a cabo en dos fases. La primera comienza el 1 de enero de 2009 y termina el 8 de noviembre de 2011; y la segunda, comienza el 1 de julio de 2012 y finaliza el 5 de septiembre del mismo año, siendo interrumpida por problemas de suministro eléctrico en tres ocasiones: entre el 8 y el 11 de julio, entre el 26 y el 31 de julio y entre el 6 y el 7 de agosto.

A diferencia de la primera fase de monitorización, en la segunda se añade una capa de poliestireno extruido de 0.07 m de espesor en la superficie interior del cerramiento orientado a sur. Por tanto, el cerramiento está constituido

por los siguientes elementos: caja metálica (0.6 m x 0.6 m x 0.08 m) conteniendo el substrato, poliestireno extruido ($e=0.07$ m, $\lambda = 0.035$ W/(m K)), estructura de anclaje y soporte vertical. El acabado exterior de uno de los paneles corresponde a una capa de vegetación de *sedum*.

En ambas fachadas se colocan tres sensores de superficie: entre la chapa y la capa de fieltro del panel; entre el panel y el poliestireno extruido; y, en la superficie interior de poliestireno extruido, al interior del módulo. Tal y como ocurre en la primera fase de monitorización, en el interior de los módulos se instalan dos sensores de temperatura ambiente localizados en la zona central y cerca de suelo y techo.

Se utiliza el mismo tipo de sensores empleados en la primera fase, (descrito en la sección 6.4).

Los datos térmicos obtenidos en la segunda fase en las fachadas son:

- temperatura superficial de la chapa metálica al exterior (T_{se});
- temperatura superficial de la chapa metálica al interior (T_{sb});
- temperatura superficial del aislante al interior (T_{si});
- temperatura del aire cerca del techo (T_c);
- temperatura del aire cerca del suelo (T_f).

El flujo térmico que atraviesa los dos cerramientos se determina utilizando dos fluxímetros posicionados en la cara interior de ambos cerramientos (Huseflux HFP01). Los resultados obtenidos con este tipo de fluxímetros son generalmente buenos los datos en literatura indican un margen de error de $\pm 5\%$.

Durante el periodo comprendido entre el 21 de agosto y el 5 de septiembre, se instalan dos fluxímetros en la superficie interior de las dos fachadas, a fin de medir el flujo térmico (TF) que atraviesa los cerramientos (figura 6.4).

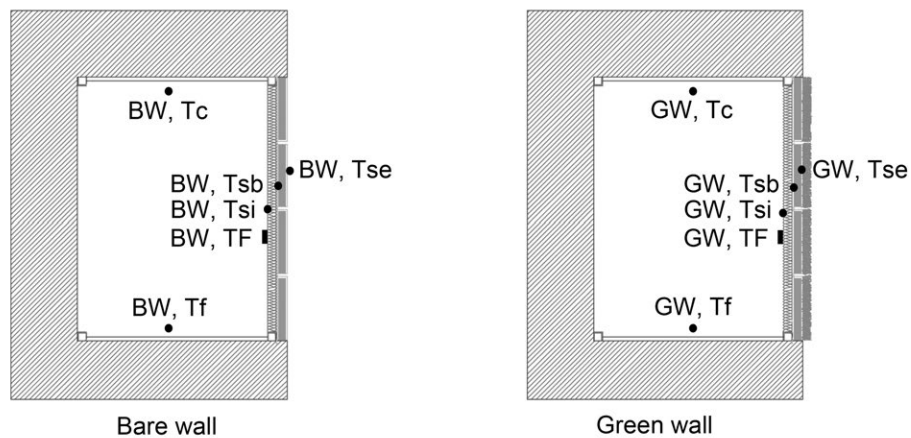


Figura 6.4: Esquema en sección de los módulos experimentales y posición de los sensores durante la segunda fase de monitorización.

Capítulo 7

Datos y análisis de resultados de la primera fase de monitorización

Dati e analisi dei risultati della prima fase di monitoraggio Basandosi sui dati ottenuti dalla centralina meteorologica collocata a lato dell'edificio sperimentale, nella prima parte di questo capitolo si realizza un'approfondita analisi del microclima del luogo attraverso un procedimento statistico di elaborazione dei dati. Dopo una descrizione generale, si prosegue esaminando i dati relativi all'irraggiamento globale, alla temperatura e all'umidità relativa durante le quattro stagioni dell'anno.

Nella seconda parte si analizzano i risultati della prima fase di monitoraggio, che si estende dall'1 gennaio del 2009 all'8 novembre del 2011. Si prendono in esame i dati separatamente, in base alla posizione delle termo-

resistenze e l'analisi si suddivide pertanto in tre sezioni:

- *temperatura della superficie esterna delle facciate;*
- *temperatura della superficie interna delle facciate;*
- *temperatura dell'aria all'interno dei moduli.*

In tutti i casi vengono confrontati i valori di temperatura misurati dalle termoresistenze presenti nella stessa posizione in entrambi i moduli.

Dal momento che ciò che interessa è studiare in parallelo il comportamento dei due moduli, piuttosto che esaminare separatamente le temperature in entrambi i moduli, si analizza la differenza di temperatura registrata in qualsiasi momento tra il modulo senza vegetazione e il modulo con vegetazione. Conseguentemente oggetto dell'analisi è il comportamento relativo di un modulo rispetto all'altro.

Infine si espongono le conclusioni di questa fase della ricerca evidenziando il miglior comportamento termico del modulo con vegetazione rispetto al modulo privo di essa.

7.1. Descripción de clima del lugar

Para tener un control directo de las condiciones climáticas locales, durante el período de monitorización se instala una estación meteorológica junto al edificio experimental. La estación registra datos cada 15 minutos, de modo

que para el estudio se toman los valores medios resultantes de un intervalo de una hora.

En este apartado se analizan las condiciones climáticas locales durante la primera fase de monitorización. Considerando que esta fase comprende casi tres años, las condiciones climáticas que se manifiestan durante ese período se pueden considerar representativas del clima del lugar objeto de estudio. Las condiciones climáticas registradas durante la segunda fase de monitorización se describen en detalle en el capítulo 8, con el fin de analizar los condicionantes climáticos específicos de este período.

Durante los tres años relativos a la primera fase de monitorización la temperatura oscila entre los -6 y los 38°C , la irradiancia total sobre plano horizontal supera sólo en dos ocasiones los 1200 W/m^2 , mientras que la humedad relativa varía considerablemente, oscilando entre un 20 y 100 %. (Solo por el 4 % del tiempo está por debajo del 20 %). Como se puede observar en la Tabla 7.1, en pocas ocasiones se registran temperaturas extremas: inferiores a 0°C en el 2 % de los casos y superiores a 30°C en el 4.1 % de los casos. De hecho, la temperatura varía entre 10 y 20°C para el 36.4 % de las horas registradas, entre 0 y 10°C para el 30.7 % y, entre 20 y 30°C para el 26.8 %.

Atendiendo a la humedad relativa, se observa cómo en el 30.5 % de los casos está por debajo del 40 %, en el 42.6 % es superior al 60 % y sólo en el 26.8 % de los casos se sitúa en el rango que se considera de confort, entre 40 y 60 %.

Analizando los datos relativos a la irradiancia sobre plano horizontal, si se descartan las horas nocturnas (44,9 % del total) y se consideran exclusivamente las horas con valores de irradiancia mayores de cero, se evidencia cómo las

Cuadro 7.1: Condiciones climáticas locales durante el período de monitorización. El número de horas es expresado en porcentaje respecto al entero período.

Temperature[°C]				
≤ 0	(0,10]	(10,20]	(20,30]	≥ 30
2.0	30.7	36.4	26.8	4.1

Relative Humidity[%]			
≤ 20	(20,40]	(40,70]	≥ 70
4	26.5	41.5	28.1

Global hor. irr.[W/(m ² K)]			
≤ 100	(100,400]	(400,800]	≥ 800
25.9	30.7	30.3	13.1

horas que comprenden el anochecer y el amanecer (irradiancia $< 100 \text{ W/m}^2$) representan aproximadamente una cuarta parte de los datos.

En la mayoría de las horas diurnas se registran valores comprendidos entre 100 y 800 W/m^2 . Partiendo de estos valores, el 30.7 % se encuentra entre 100 y 400 W/m^2 y, el 30.3 %, entre 400 y 800 W/m^2 , respectivamente. Sólo en el 13.1 % de las horas la irradiancia supera los 800 W/m^2 .

La figura 7.1 muestra cómo en los tres años objeto de estudio la evolución de las temperaturas mínimas y máximas diarias es parecida.

Durante los periodos de verano, las temperaturas mínimas en la mayoría de los casos no bajan de 15°C , mientras que las máximas muchas veces superan los 30°C . Las temperaturas mínimas mayores se registran en el verano de 2010, mientras que las mayores máximas en el verano de 2011.

Respecto a los periodos de invierno, se observa cómo durante los meses de enero y febrero de 2010 y 2011 se registran las temperaturas mínimas

menores, mientras que las temperaturas máximas menores en diciembre de 2009.

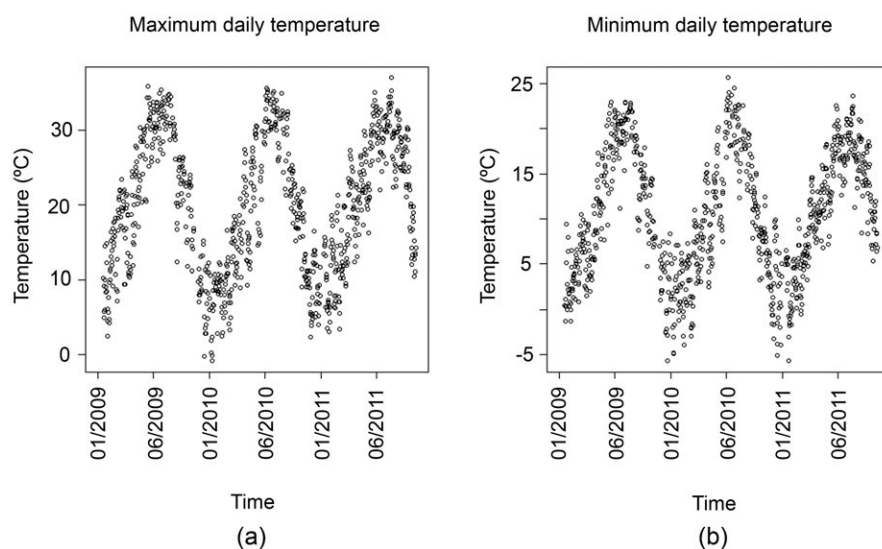


Figura 7.1: Evolución de la temperatura máxima (a) y mínima (b) diaria.

A fin de realizar un estudio más detallado sobre las condiciones climáticas durante las diferentes estaciones del año, se agruparon los datos por fecha en cuatro categorías: invierno, primavera, otoño y verano.

En cada una de ellas, se analizaron los datos correspondientes a una estación durante los tres años, de manera que cada categoría sintetiza las características de la estación objeto de análisis durante el periodo completo de estudio.

Para ello se utiliza el diagrama de cajas y bigotes, una representación gráfica muy generalizada dentro de los estudios estadísticos, que permite observar los cuartiles, el máximo y el mínimo, una vez eliminados los atípicos. De esta forma, separando las observaciones atípicas se pueden advertir una

medida de centralización (la mediana), dos medidas de dispersión (el rango intercuartílico y el rango) y la posible simetría de la muestra.

Se define el percentil k de una muestra como aquel valor que deja el $k\%$ de las observaciones por debajo de él. En el diagrama de cajas se representan 5 percentiles:

- el mínimo o el percentil cero;
- el percentil 25 es el que deja el 25 % de la muestra por debajo de él, también llamado primer cuartil, Q_1 ;
- el percentil 50 es el que deja el 50 % por debajo de él, también llamado segundo cuartil o mediana;
- el percentil 75 es el que deja el 75 % por debajo de él, también llamado tercer cuartil, Q_3 ;
- el máximo o percentil 100.

Para la realización del gráfico, se dibuja una caja cuyos lados superior e inferior corresponden con el primer y tercer cuartil. Esta caja se encuentra dividida por un segmento que es la mediana. A la distancia entre el primer y el tercer cuartil se le llama rango intercuartílico (RI). Para el cálculo de los bigotes se resta $1.5RI$ al primer cuartil y se suma $1.5RI$ al tercer cuartil. Cualquier valor menor que $Q_1 - 1.5RI$ o mayor que $Q_3 + 1.5RI$ se considera atípico. Los bigotes representan los valores mínimo y máximo una vez eliminados los atípicos.

Esta representación tiene la ventaja de ser robusta (muy poco influenciada por valores atípicos), separa y representa los valores atípicos, dibuja la

posición de los cinco percentiles más relevantes, da una idea de la dispersión de los datos sin tener en cuenta los valores atípicos y determina la posible simetría de la muestra.

7.1.1. Invierno

Durante el invierno (figura 7.2a), se registran valores positivos de irradiancia entre las 8:00 y las 18:00 horas, siendo el valor máximo alrededor de las 13:00 horas y coincidente, a su vez, con el pico de verano (figura 7.3a). Durante la mañana y la tarde, la variabilidad de los datos es baja, mientras que en las horas centrales del día es notablemente alta.

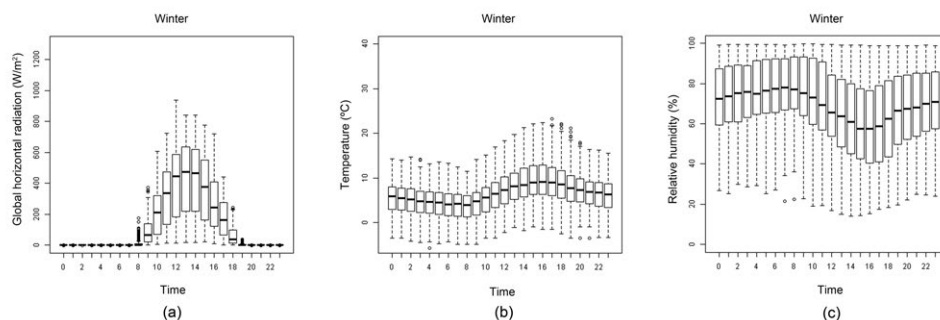


Figura 7.2: Diagrama de cajas múltiple para la evolución horaria de la irradiancia global sobre superficie horizontal (a), la temperatura (b) y la humedad relativa (c) exteriores en invierno.

Aunque el valor máximo de la mediana sobrepase en raros casos los 400 W/m^2 , se registran días soleados en los que la irradiancia en las horas centrales del día alcanza los 700 W/m^2 . Las temperaturas más altas (figura 7.2b) se alcanzan entre las 15:00 y las 17:00 horas, las más bajas entre la 6:00 y las 8:00 horas.

Los datos varían notablemente durante las horas de la tarde, reduciéndose un poco esta variación durante la noche y la mañana. La mediana oscila entre 4 y 8 °C y, si descartamos los atípicos, el resto de temperaturas varían entre −5 y 22 °C. Las humedades relativas (figura 7.2c) más bajas se registran durante la noche y las más altas durante las horas más cálidas del día. Aunque los datos presenten una gran variabilidad, la mediana oscila entre aproximadamente el 60 y el 80 %.

7.1.2. Verano

Durante el verano (figura 7.3a), las horas de sol son, en media, 5 más que durante el invierno: se empiezan a registrar valores positivos de irradiancia alrededor de las 6:00 horas y se sigue con luz diurna hasta las 21:00 horas.

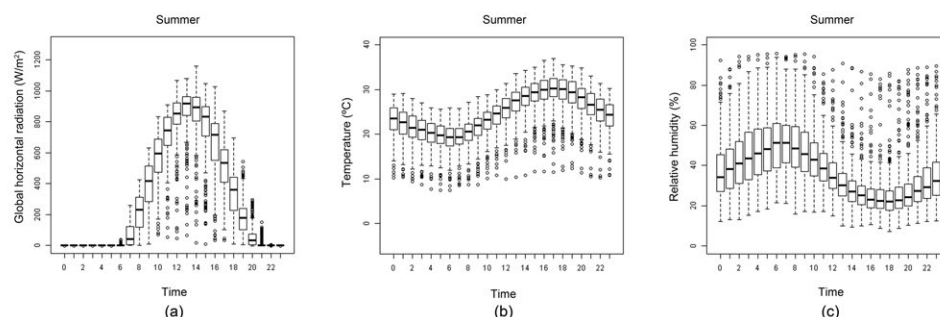


Figura 7.3: Diagrama de cajas múltiple para la evolución horaria de la irradiancia global sobre superficie horizontal (a), la temperatura (b) y la humedad relativa (c) exteriores en verano.

A pesar de que la mediana en ningún caso supera los 900 W/m², entre las 13:00 y las 14:00 horas en varias ocasiones sobrepasa los 1000 W/m². Entre las 13:00 y las 18:00 horas la variabilidad de los datos es mayor que en el resto de las horas del día.

Referente a las temperaturas (figura 7.3b), se nota cómo los datos están menos concentrados respecto al invierno, la mediana fluctúa entre 20 y 30 °C y en prácticamente todas las horas del día la variabilidad de los datos es de aproximadamente de 15 °C. Se registran picos de temperatura superiores a 35 °C y valores atípicos inferiores a 10 °C.

También la humedad relativa (figura 7.3c) presenta una gran variabilidad. Desde el mediodía hasta el anochecer prácticamente todos los valores son inferiores al 50 % y la mediana varía entre el 20 y el 40 %, alcanzando su mínimo alrededor de las 18:00 horas. Durante las horas nocturnas y las primeras horas de la mañana la humedad relativa es significativamente más alta, aunque en todas las horas del día el 75 % de los datos registrados nunca supera el 60 % de humedad relativa.

7.1.3. Primavera y otoño

Comparando las estaciones intermedias, podemos notar cómo en todas las horas del día la irradiancia en primavera es, en media, mayor que la irradiancia en otoño (figura 7.4a). Además, en primavera la variabilidad es bastante mayor que en otoño.

Desde las 12:00 hasta las 14:00 horas la irradiancia se mantiene prácticamente constante en primavera, mientras que en otoño, como en el resto de las estaciones, el pico máximo se alcanza alrededor de las 13:00 horas. Sin embargo, las temperaturas (figura 7.4b) varían bastante más en otoño que en primavera, sobre todo durante la tarde y la noche.

En primavera, las temperaturas son ligeramente más suaves que en otoño,

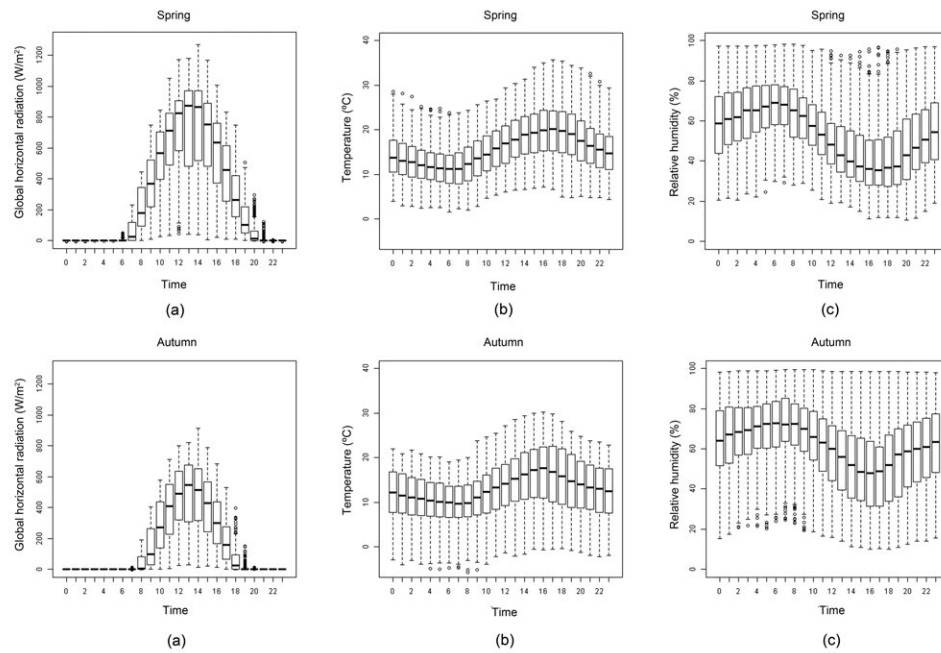


Figura 7.4: Diagrama de cajas múltiple para la evolución horaria de la irradiancia global sobre superficie horizontal (a), la temperatura (b) y la humedad relativa (c) exteriores en verano.

oscilando la mediana entre 12 y 20 °C en primavera y entre 10 y 18 °C en otoño. La mediana de la humedad relativa (figura 7.4c) en ambas estaciones presenta su máximo alrededor del 70 % justo antes del amanecer y su mínimo sobre las 17:00 horas al 35 % en primavera y 45 % en otoño.

El 50 % de los datos oscila aproximadamente entre el 35 % y el 80 % y la variabilidad de los mismos es mayor en otoño que en primavera, notándose mayores diferencias principalmente durante las horas de la tarde.

Cuadro 7.2: Frecuencias relativas en porcentaje de la combinación de temperatura y humedad relativa en los tres años estudiados.

RH [%]	Temperature [°C]						Sum
	≤ 5	(5,10]	(10,15]	(15,20]	(20,25]	≥ 25	
(0,40]	0.4	0.7	2.0	4.6	9.2	13.6	30.5
(40,70]	4.8	7.7	9.7	11.4	7.0	0.9	41.5
(70,100]	7.2	11.9	6.8	2.0	0.1	0.0	28.0
Sum	12.4	20.3	18.5	17.9	16.4	14.5	100.0

7.2. Datos

Los paneles con vegetación, previamente cultivados en vivero, se montaron en el edificio experimental completamente desarrollados. Por esta razón, el sistema de adquisición de datos empezó a suministrar datos fiables desde el principio de la monitorización, en noviembre de 2008. En este estudio, se analizan los datos tomados entre el 1 de enero de 2009 y el 8 de noviembre de 2011. La gran cantidad de datos suministrados por los sistemas de adquisición supuso que se optara por un tratamiento estadístico de los mismos.

A continuación, se describen los resultados de la monitorización. En todos los casos se comparan las temperaturas registradas por las termo-resistencias colocadas en la misma posición en ambos módulos. Dado que lo que interesa es el comportamiento del módulo con vegetación frente al módulo sin ella, en lugar de analizar por separado las temperaturas en ambos módulos, se analiza la diferencia de temperatura registrada en cada momento entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación, tratando dicha diferencia como variable.

Cuadro 7.3: Valor medio e desviación estándar (entre paréntesis) de las diferencias de temperaturas registradas por los sensores colocados en la misma posición en ambos módulos, para los casos más frecuentes de la combinación de temperatura y humedad relativa exteriores.

T [°C]	≤ 5	(5,10]	(5,10]	(10,15]	(10,15]	(15,20]	(20,25]	(20,25]	≥ 25
RH [%]	(70,100]	(40,70]	(70,100]	(40,70]	(70,100]	(40,70]	(0,40]	(40,70]	(0,40]
Ext.	-0.93 (3.48)	2.79 (9.64)	-0.02 (4.42)	4.05 (9.82)	0.60 (5.47)	4.37 (9.05)	8.62 (10.98)	5.80 (7.89)	13.83 (9.52)
Int.	-0.26 (1.24)	1.99 (2.73)	0.55 (1.26)	2.62 (2.51)	1.27 (1.50)	3.47 (2.16)	6.26 (2.86)	4.84 (2.04)	8.62 (2.68)
Floor	0.45 (0.80)	1.86 (1.04)	0.90 (0.77)	2.21 (1.15)	1.30 (0.88)	2.92 (1.23)	4.51 (1.30)	3.86 (1.08)	5.37 (1.28)
Ceiling	0.80 (0.83)	2.50 (1.34)	1.24 (0.81)	2.76 (1.38)	1.65 (0.93)	3.35 (1.29)	5.03 (1.60)	4.08 (1.15)	5.99 (1.64)

El cuadro 7.2 presenta las frecuencias relativas de la combinación de temperatura y humedad relativa en los tres años estudiados. Se ha analizado la variable diferencia de temperatura para los casos más frecuentes (más del 75 % de los casos). El cuadro 7.3 presenta los valores medios de dicha variable, figurando debajo de la media, entre paréntesis, la desviación estándar de dicha variable.

Asimismo, se han analizado los cuatro sensores mes a mes. A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de los sensores y se muestra el comportamiento de cada uno de ellos, en los cuatro mese más representativos para cada caso.

7.3. Temperatura superficial exterior

Observando la evolución de la temperatura superficial exterior (figura 7.5), se nota cómo su comportamiento es muy diferente de noche y de día.

Lo cierto es que, en la mayoría de los meses, durante la noche el módulo sin vegetación registra una temperatura inferior a 162°C respecto al módulo con vegetación. Por el contrario, la temperatura en el módulo sin vegetación durante el día es considerablemente más alta que la temperatura en el módulo con vegetación. La diferencia es mayor a medida que aumenta la radiación solar, registrando su pico máximo alrededor de las 14:00 horas. Además, durante la noche los datos aparecen concentrados, mientras que durante el día están notablemente más dispersos.

Durante los meses de junio, julio y agosto, el comportamiento por la noche es diferente respecto al resto de meses del año. De hecho, en estos meses la temperatura en el módulo sin vegetación se mantiene más alta que en el módulo con vegetación tanto de noche como de día. En las horas nocturnas, las diferencias son muy pequeñas, siendo la mediana apenas superior a 0°C . Sin embargo, durante las horas más cálidas del día oscila entre 20 y 25°C . Asimismo, durante las horas diurnas el 50 % de los datos está comprendido entre 15 y 30°C y se alcanzan picos de más de 40°C de diferencia.

Por último, se observa cómo la dispersión de los datos durante las horas diurnas es mucho mayor en los meses fríos que en los meses cálidos. De estos primeros resultados se deduce que el efecto termo-regulador de la vegetación es beneficioso sobre todo durante el verano, siendo mayor la reducción de temperatura durante las horas con mayor radiación solar.

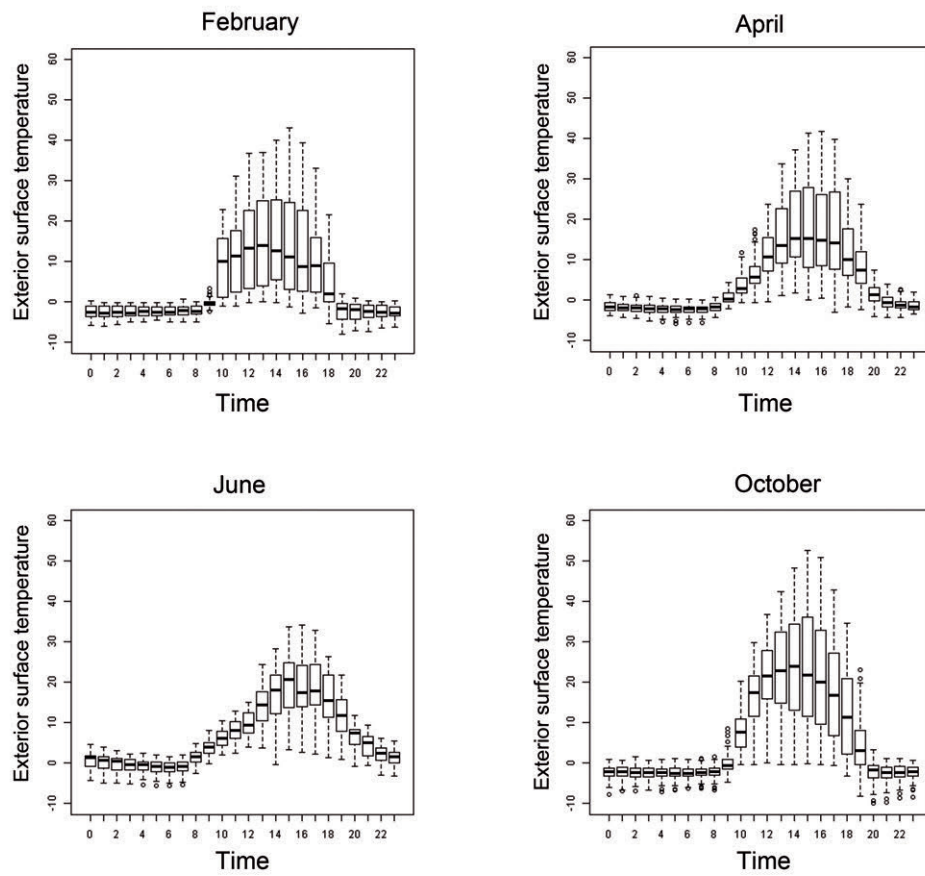


Figura 7.5: Evolución horaria de la diferencia de temperatura en la superficie exterior del panel en cuatro meses de referencia.

7.4. Temperatura superficial interior

Analizando la temperatura superficial interior (figura 7.6), se observa cómo la inercia térmica del panel influye en que las diferencias entre los dos módulos se vean atenuadas con respecto al sensor anterior. Durante las horas nocturnas de los meses con menor radiación, apenas se detectan diferencias de temperatura entre los dos módulos.

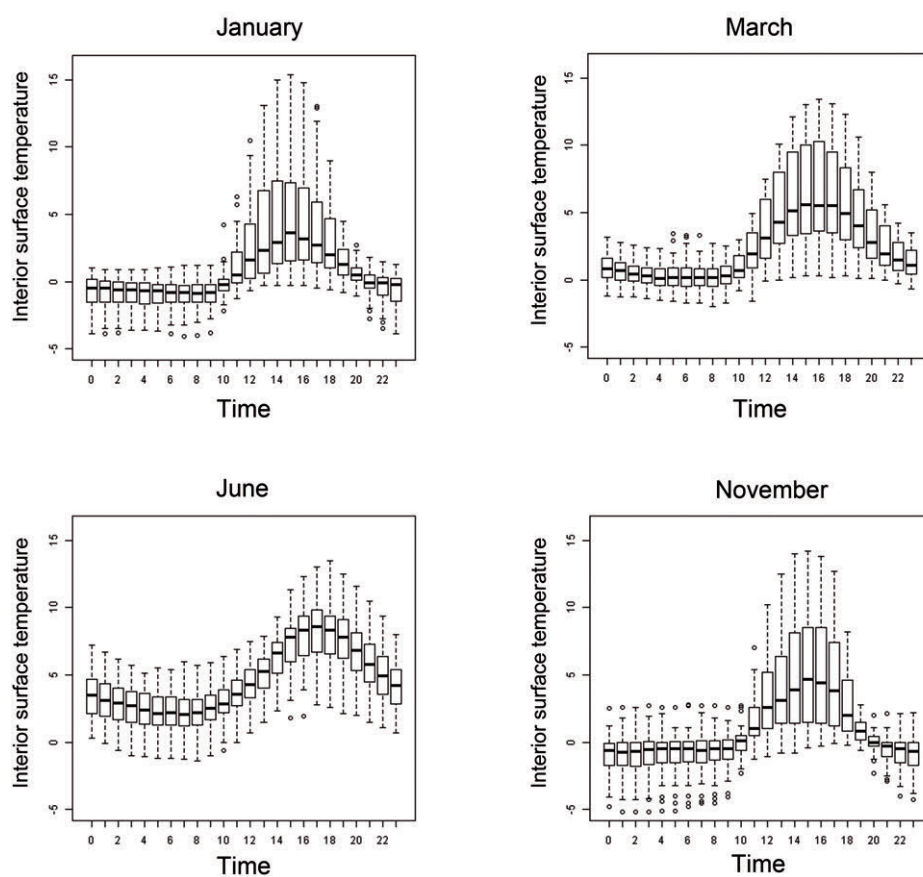


Figura 7.6: Evolución horaria de la diferencia de temperatura en la superficie interior del panel en cuatro meses de referencia.

En caso de darse dichas diferencias, es en el módulo sin vegetación donde se registran temperaturas más bajas. Durante el día, se da la situación contraria, la mediana de las diferencias es positiva aunque su valor es muy bajo, oscilando entre 0 y 5 °C. En las horas diurnas los datos están bastante dispersos, mientras que en las horas nocturnas están muy concentrados. Este efecto resulta positivo para el balance térmico de la fachada, ya que en los meses más fríos del año, la capa adicional de vegetación consigue que la tem-

peratura superficial en el módulo con vegetación durante el momento más frío del día (la noche) sea ligeramente superior a la temperatura superficial en el módulo sin vegetación.

De mayo a agosto, la temperatura en el módulo sin vegetación casi siempre (más del 99 % de las veces) es mayor que en el módulo con vegetación. La menor diferencia se registra justo antes del amanecer, en el momento más frío del día, donde las diferencias mayores se dan entre las 16:00 y las 18:00 horas. El rango de variación de la mediana se encuentra entre 1 y 11 °C y destaca una gran concentración de datos alrededor de la mediana, siendo simétricos a ella durante el día.

En los meses de primavera y otoño, la temperatura en el módulo sin vegetación durante las horas centrales del día es siempre superior a la del módulo con vegetación. La mediana varía entre 5 y 12 °C, pero los datos se encuentran más dispersos respecto a los meses de verano. También durante la noche la temperatura en el módulo con vegetación es menor que en el módulo sin vegetación en la mayoría de los casos, aunque en aproximadamente un 15 % de los casos se dé la situación contraria. Las diferencias detectadas son bastante pequeñas, la mediana nunca supera los 4 °C. Los valores son constantes durante todas las horas nocturnas, distribuyéndose generalmente de forma simétrica y concentrada.

En conjunto, se puede afirmar que, aunque el efecto de la vegetación se vea reducido por la inercia térmica del panel, se sigue notando una gran diferencia entre los dos módulos. Además, la presencia de vegetación induce a un descenso mayor de la temperatura interna del panel durante la tarde de los meses de verano, representando normalmente el momento más crítico de

todo el año debido al sobrecalentamiento de las superficies externas.

7.5. Temperatura interior

A pesar de notar ciertas diferencias, los resultados obtenidos en la superficie interior muestran una tendencia paralela al comportamiento de la temperatura del aire medida cerca del suelo y cerca del techo. Durante prácticamente todos los meses, las gráficas de techo y suelo son bastantes parecidas aunque en el techo se observen mayores diferencias entre los dos módulos respecto a las observadas en el suelo (figura 7.7). A lo largo de todo el período de medición, se aprecia que la mediana de los datos horarios es siempre positiva. De hecho el 75 % de los datos para cada franja horaria es positivo salvo en diciembre y enero.

Una vez más, las diferencias mayores se registran durante el día.

En los meses de invierno, durante la noche los datos están más concentrados que durante el día. La mediana varía entre 0 y 2 °C y es prácticamente constante durante la noche. En verano las diferencias entre los dos módulos son mayores, la mediana oscila entre 2 y 7 °C y se observa una mayor concentración de datos respecto al invierno, sobre todo en las horas diurnas. Durante las tardes de los meses de julio y agosto, la mediana nunca baja de los 5 °C y se registran entre los dos módulos diferencias de 8 a 10 °C en el 25 % de los casos. En los meses de primavera y otoño, obtenemos resultados similares durante el día a los registrados en verano. Probablemente, esto se deba a que estos meses están caracterizados por elevados valores de irradiancia en la superficie vertical orientada a sur. Por otro lado, la variabilidad en

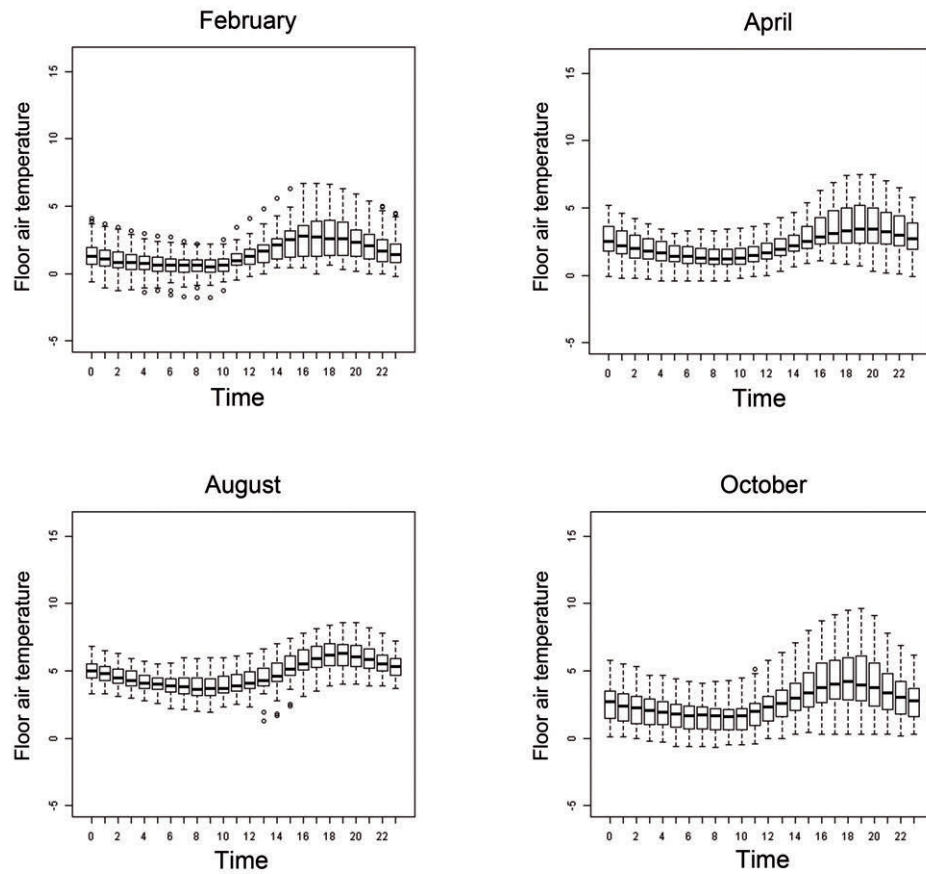


Figura 7.7: Evolución horaria de la diferencia de temperatura en la superficie interior del panel en cuatro meses de referencia.

las condiciones meteorológicas provoca que los datos se encuentren notablemente más dispersos respecto de los registrados en verano, tanto durante el día como durante la noche. En conclusión, podemos decir que la presencia de vegetación en la superficie exterior del módulo se traduce en una considerable reducción de las temperaturas internas, sobre todo durante las horas diurnas. En los momentos más cálidos del año, las tardes de los meses de julio y agosto, la diferencia de temperatura entre los dos módulos es prácticamen-

te constante y alcanza sus máximos valores. Este hecho sea probablemente consecuencia del efecto de la evapotranspiración de las plantas, al ser más efectivo cuando el nivel de humedad relativa en el exterior alcanza valores mínimos. También es notable el efecto de la vegetación en los meses en los que la irradiancia sobre superficie vertical orientada a sur es muy elevada. Bajo estas condiciones, las plantas actúan como un elemento de sombreado que consigue reducir varios grados la temperatura en el interior de los módulos, al evitar el sobrecalentamiento de la superficie exterior.

7.6. Conclusiones

El estudio demuestra que en la mayoría de los casos el módulo con vegetación registra temperaturas inferiores a las del módulo sin vegetación. Este efecto se intensifica al aumentar la temperatura exterior, alcanzando los valores máximos para temperaturas exteriores mayores de 25 °C y humedades relativas menores del 40 %. Bajo estas condiciones, propias de la estación estival, se observa un descenso medio de la temperatura de 8.6 °C en la superficie interior del cerramiento y de aproximadamente 5.5 °C en el interior.

Durante el invierno, aunque en media las temperaturas en módulo con vegetación sean más bajas, las diferencias registradas son pequeñas y los datos son mucho más variables, dándose casos en los que las temperaturas en el módulo con vegetación son superiores a las del módulo sin ella.

Estos resultados indican el potencial de las fachadas vegetales en la reducción de la temperatura superficial de edificios situados en lugares con clima mediterráneo continental, que a su vez se traduce en una reducción de la

demanda energética durante el verano y la consiguiente bajada de consumo en refrigeración.

La utilización de estos sistemas vegetales parece recomendable en climas similares al caso de estudio, ya que los beneficios que aportan durante el verano son considerablemente más significativos frente a las posibles desventajas asociadas al invierno.

Capítulo 8

Datos y análisis de resultados de la segunda fase de monitorización

Dati e analisi dei risultati della seconda fase di monitoraggio

In questo capitolo si analizzano i dati registrati durante la seconda fase di monitoraggio, che va dal 1^o luglio 2012 al 5 settembre dello stesso anno. Per problemi di alimentazione elettrica, il monitoraggio ha presentato tre interruzioni: tra l'8 e l'11 luglio, tra i 26 e 31 luglio e dal 6 al 7 agosto.

Durante questa fase, nella facciata dei due moduli si inserisce un pannello di poliestirene estruso ($e=0.07$ m, $\lambda =0.035$ W/(m K)) ottenendo due serramenti con trasmittanze termiche simili, 0.37 W/m² K per la facciata con vegetazione e 0.33 W/m² K per la facciata senza vegetazione. La differenza è dovuta principalmente al fatto che nel primo caso il substrato viene man-

tenuto umido mentre nel secondo caso il substrato è secco ed ha quindi un valore di conducibilità termica inferiore.

Dopo una breve descrizione delle condizioni climatiche locali durante la fase di monitoraggio, si passa ad analizzare i dati registrati dalle termoresistenze posizionate all'interno del modulo e nei vari strati della facciata sud e dai flussimetri collacati sulla superficie interna della facciata sud.

I dati ottenuti vengono analizzati ponendo attenzione principalmente ai seguenti aspetti:

- *temperatura minime e massime registrate ogni giorno;*
- *riduzione delle temperatura dovute allo strato di vegetazione;*
- *sfasamento dell'onda termica in entrambi in moduli;*
- *gradiente termico misurato in entrambi i moduli sotto le stesse condizioni esterne;*
- *flussi termici.*

In fine si espongono le conclusioni di questa fase della ricerca mettendo in evidenza che l'uso di elementi vegetali in facciata è termicamente favorevole anche nel caso di serramenti isolati e che può essere considerato a tutti gli effetti una soluzione di raffrescamento passivo per gli edifici.

8.1. Condiciones climáticas locales

Con el fin de comprobar el efecto del recubrimiento vegetal en fachadas aisladas, en la segunda fase de monitorización se añade, en la superficie interior del cerramiento orientado a sur, una capa de poliestireno extruido de 0.07 m de espesor. Por tanto, el cerramiento está constituido por los siguientes elementos: caja metálica (0.6 m x 0.6 m x 0.08 m) conteniendo el sustrato, poliestireno extruido ($e=0.07$ m, $\lambda = 0.035$ W/(m K)), estructura de anclaje y soporte vertical. El acabado exterior de uno de los paneles corresponde a una capa de vegetación de *sedum*.

La monitorización comienza el 1 de julio y finaliza el 5 de septiembre, teniendo que ser interrumpida en tres ocasiones debido a problemas de suministro eléctrico: entre el 8 y el 11 de julio, entre el 26 y el 31 de julio y entre el 6 y el 7 de agosto. La localidad de Colmenar Viejo se caracteriza por un clima mediterráneo continental, con veranos cálidos-secos. Como se puede observar en el cuadro 8.1, durante el período de monitorización, la irradiancia global sobre superficie horizontal supera los 900 W/m² en el 85 % de los días y los 1000 W/m², en el 36 % de los días, es decir se trata de una zona con alta radiación solar.

Las temperaturas máximas diarias oscilan entre 24 °C y 38 °C, siendo en el 17 % de los días superiores a 35 °C y en el 30 % de los días, 30 °C. Las temperaturas mínimas diarias varían entre 10 °C y 27 °C, siendo en el 28 % de los días inferiores a 17 °C y en el 23 % de los días, superiores a 21 °C. Las temperaturas medias diarias en la mayoría de los casos son superiores a 24 °C, un 20 % de los días supera los 28 °C y sólo en el 15 % de los casos son

Cuadro 8.1: Condiciones climáticas locales durante el período de monitorización. El número de días está expresado en porcentaje respecto al número total de días del período de monitorización.

Irr. max [W/(m ² K)]		T. med [°C]			T. max [°C]		T. min [°C]		HR,med [%]	
>900	>1000	>24	>28	<22	>35	<30	<17	>21	<25	>35
85 %	36 %	64 %	20 %	15 %	17 %	30 %	28 %	23 %	28 %	32 %

inferiores a 22 °C. La humedad relativa media diaria varía entre el 16 % y el 52 %, siendo en el 28 % de los casos inferior al 25 % y en el 32 % de los casos, mayor del 35 %. No se registra ningún día de lluvia. Todo esto muestra un clima de temperaturas altas, aunque no extremas, con una gran oscilación media diaria y básicamente seco.

En los siguientes apartados se detallan cada uno de los análisis realizados.

8.2. Temperaturas del aire y superficiales

Los resultados más importantes de esta fase de la investigación relativos a los valores de temperaturas medidos en las distintas capas del cerramiento y al interior de los módulos son los siguientes:

- temperaturas mínimas y máximas registradas cada día;
- reducción de las temperaturas debida a la capa vegetal;
- desfase de la onda térmica en cada uno de los módulos;
- temperaturas registradas en las diferentes capas de los dos cerramientos bajo las mismas condiciones exteriores.

8.2.1. Temperaturas mínimas y máximas

Los gráficos 8.1 y 8.2 muestran las temperaturas mínimas registradas a lo largo de cada día: temperatura del aire en el exterior y en el interior de los módulos y temperatura superficial interior y exterior de la pared. A partir de

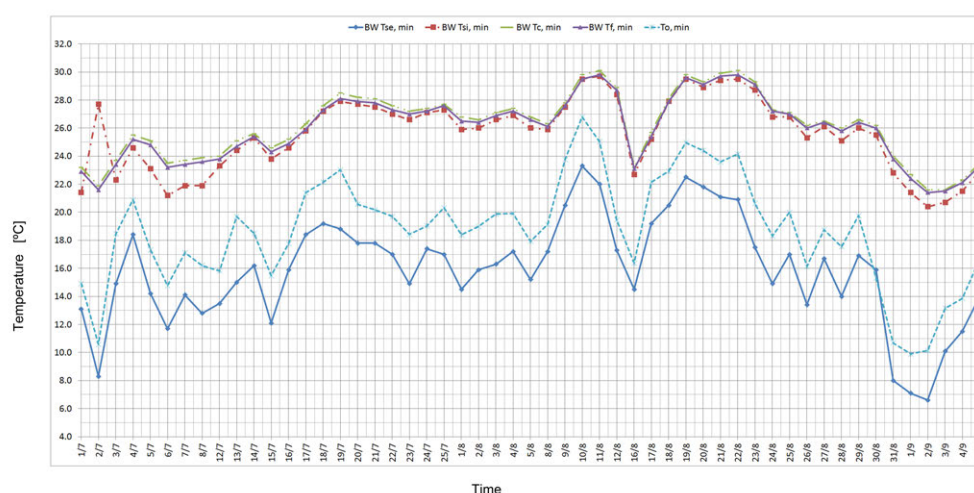


Figura 8.1: Temperaturas mínimas registradas en el módulo sin vegetación.

la temperatura superficial exterior se observa cómo en ambos casos la temperatura superficial mínima de la pared es inferior a la temperatura mínima del aire. En el módulo sin vegetación, la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura de la pared oscila entre 2 °C y 4 °C en la mayoría de los casos y nunca supera los 5 °C. Sin embargo, en el módulo con vegetación esta diferencia en media es superior a la anterior y considerablemente más variable. Algunos días la diferencia registrada es sólo 1 °C, mientras que otros días se alcanzan picos de 8 °C - 9 °C de diferencia (figura 8.3). Parece evidente que la superficie exterior de la fachada vegetal se ve afectada tanto por la humedad del substrato como por la variabilidad de la misma. En consecuen-

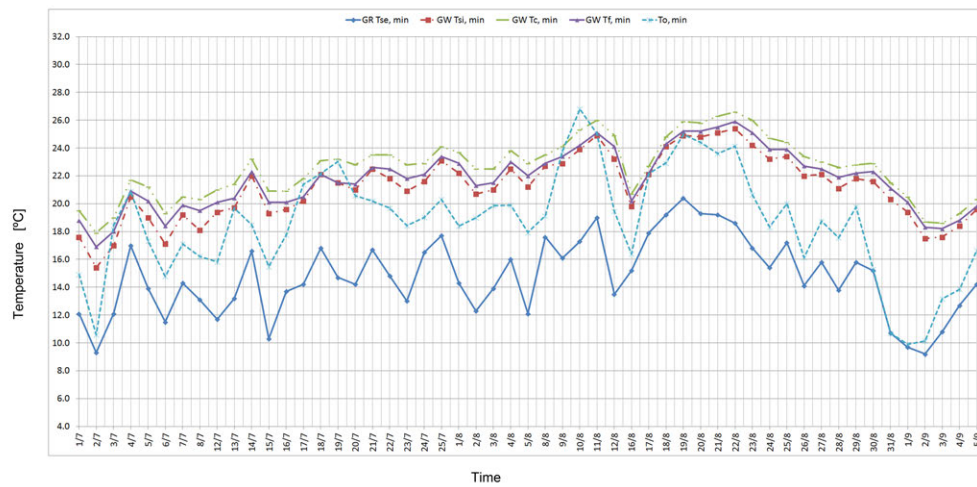


Figura 8.2: Temperaturas mínimas registradas en el módulo con vegetación.

cia, las diferencias entre los mínimos registrados en la superficie exterior y en el aire exterior son muy variables y, en la mayoría de los casos, superiores a las diferencias registradas entre la fachada testigo y el aire exterior. Probablemente, el comportamiento mucho más estable de la fachada testigo se deba al menor número de variables en juego. Respecto a las temperaturas interiores, se observa cómo en el módulo sin vegetación son claramente superiores a la temperatura exterior del aire, siendo esta diferencia entre 4 °C y 10 °C. En el módulo con vegetación la diferencia se reduce significativamente, dándose casos en los que las temperaturas interiores mínimas son similares a la temperaturas mínimas del aire. Las temperaturas interiores se refieren a la temperatura superficial de la pared y a la temperatura del aire medida cerca del techo (T_c , min) y del suelo (T_f , min). En el caso del módulo sin vegetación, las tres temperaturas son muy parecidas y oscilan entre 19 °C y 30 °C, siendo en la mayoría de los casos superiores a 25 °C. En el caso del

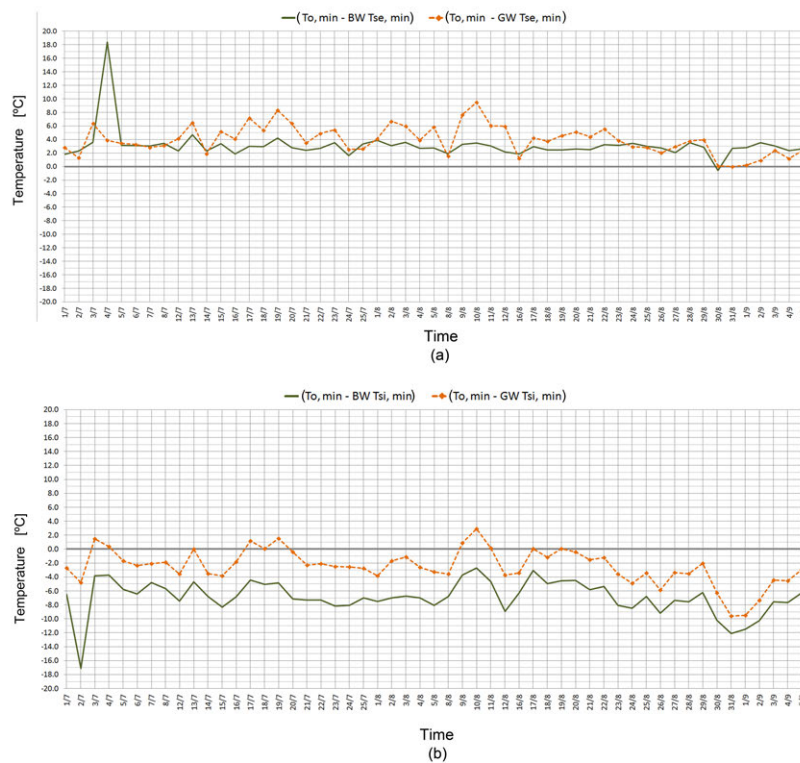


Figura 8.3: Diferencias entre la temperatura mínima del aire y las temperaturas superficiales mínimas registradas en el módulo sin vegetación (a) y en el módulo con vegetación (b).

módulo con vegetación, las tres temperaturas siguen el mismo perfil pero sin llegar a coincidir. La temperatura superficial interior es en media 1 °C inferior a la temperatura del aire medida cerca del suelo y 2 °C inferior a la temperatura del aire medida cerca del techo. Las temperaturas oscilan entre 15 °C y 26 °C, situándose por debajo de 25 °C en el 90 % de los casos. La temperatura superficial interior nunca supera los 25 °C. Se puede observar cómo el uso de plantas reduce el rango de temperaturas entre la superficie exterior e interior de la fachada, además de reducir los valores de temperatura. Por lo tanto,

podemos deducir que la incorporación de vegetación supone una mejora en las condiciones ambientales para los ocupantes durante la estación estival. En el gráfico 8.3 se puede observar la diferencia entre la temperatura mínima del aire exterior y las temperaturas mínimas en las superficies interiores de los dos módulos registradas cada día. En el caso del módulo sin vegetación, el gráfico correspondiente a las temperaturas máximas registradas a lo largo de cada día (figura 8.4). muestra cómo la temperatura superficial exterior

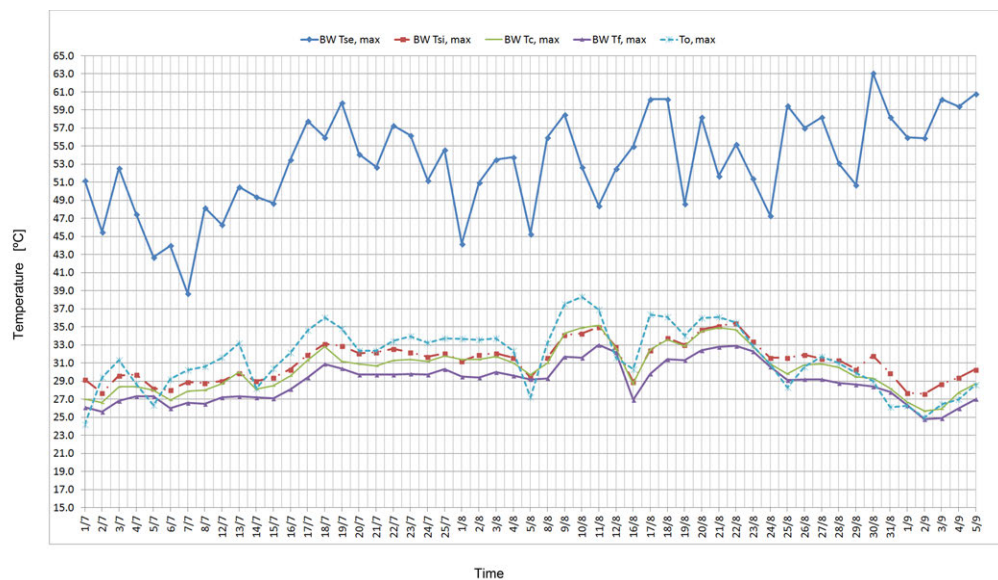


Figura 8.4: Temperaturas máximas registradas en el módulo sin vegetación.

máxima es muy alta y considerablemente superior a la temperatura máxima del aire. De hecho, la temperatura superficial exterior máxima oscila entre 38 °C y 63 °C y la diferencia con la temperatura del aire máxima varía entre 8 °C y 35 °C, siendo en el 50 % de los casos superior a 20 °C (figura 8.5).

Estos valores tan elevados se deben también al material empleado en fa-

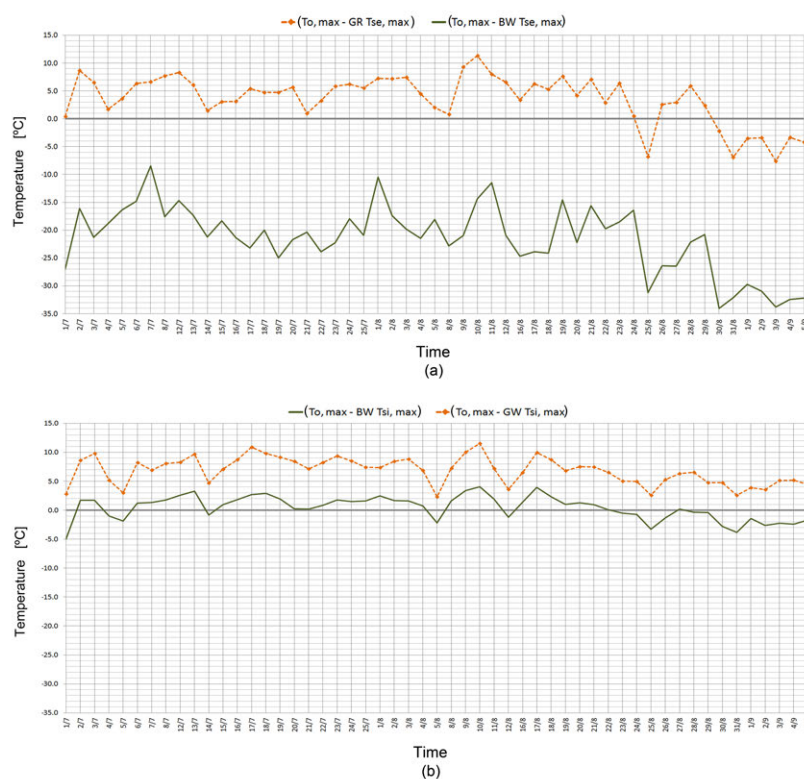


Figura 8.5: Diferencias entre la temperatura máxima del aire y las temperaturas superficiales máximas registradas en el módulo sin vegetación (a) y en el módulo con vegetación (b).

chada, puesto que los metales debido a su alta difusividad se calientan mucho bajo la radiación solar. Sin embargo, en el caso del módulo vegetal (figura 8.6) se da la situación contraria: la temperatura superficial máxima es en la mayoría de los casos más baja que la temperatura máxima del aire. Esta condición se verifica prácticamente siempre, menos en algunos días de finales de agosto y comienzo de septiembre en los que la temperatura superficial es superior a la temperatura del aire. Estos resultados demuestran que las superficies vegetales son capaces de evitar el sobrecalentamiento de la fachada

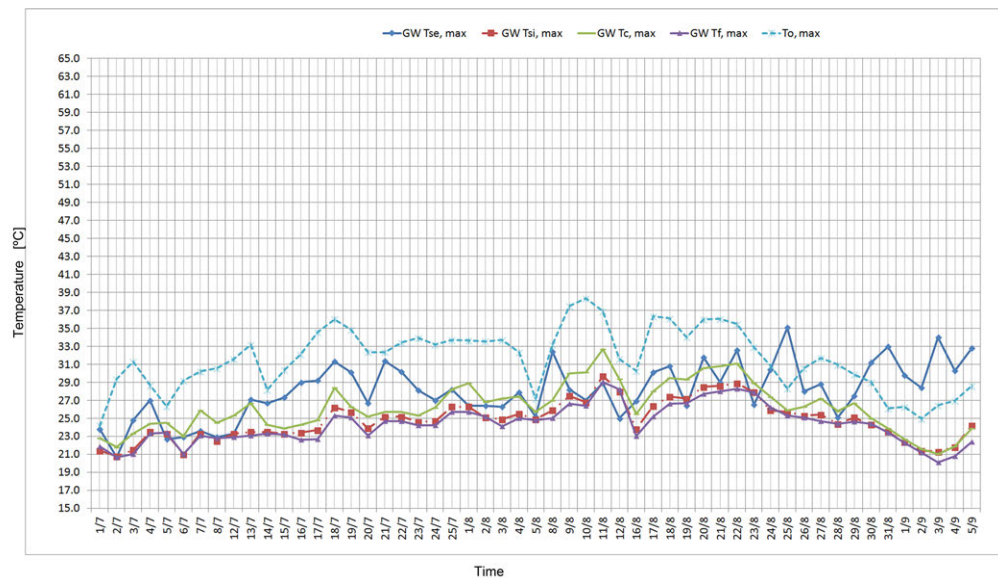


Figura 8.6: Temperaturas máximas registradas en el módulo con vegetación.

y además permiten cuantificar el efecto de refrigeración debido al sombreado de las plantas y al enfriamiento evaporativo: la media de la diferencia entre la temperatura máxima del aire y la temperatura exterior superficial máxima es de 5°C , alcanzando picos de 11°C (figura 8.5). Como consecuencia de las bajas temperaturas máximas registradas en la superficie exterior de la fachada, las temperaturas máximas registradas en la superficie interior de la fachada son también muy bajas. En el gráfico 8.5 se puede observar la diferencia entre la temperatura máxima del aire exterior y la temperatura máxima en las superficies interiores de los dos módulos registradas cada día. En el caso del módulo con vegetación, se nota cómo la diferencia siempre es positiva, oscilando entre 2°C y 12°C . Respecto al módulo sin vegetación la diferencia es negativa en muchos casos y, cuando es positiva, resulta ser aproximadamente 6°C o 7°C inferior a la diferencia entre la temperatura máxima en el

aire exterior y la temperatura máxima en la superficie interior del módulo con vegetación. La figura 8.6 muestra cómo durante todo el período de medición las temperaturas se sitúan por debajo de 29 °C y en el 50 % de los casos por debajo de los 25 °C. Las temperaturas máximas del aire en el interior de los módulos siguen la misma tendencia que la temperatura superficial máxima, oscilando entre 20 °C y 30 °C durante todo el período de medición. Sólo la temperatura del aire medida cerca del techo supera en cuatro ocasiones los 30 °C. Por contra, observando el gráfico de las temperaturas máximas del módulo sin vegetación (figura 8.4) se nota cómo las temperaturas interiores máximas nunca bajan de 25 °C. Además, aproximadamente en el 50 % de los casos estas temperaturas son superiores a 30 °C, alcanzando picos de 35 °C, correspondientes a la temperatura superficial y la temperatura del aire medida cerca del techo. Estos resultados demuestran que las fachadas vegetales pueden ser empleadas como estrategias de enfriamiento pasivo. Por tanto, tras observar que la temperatura superficial interior máxima registrada en el cerramiento vegetal es en media 5 °C inferior a la temperatura superficial máxima registrada en el cerramiento sin vegetación, se puede concluir que la utilización de fachadas vegetales en edificios supondría un descenso de la temperatura operativa de los mismos, favoreciendo el confort de los usuarios gracias a la utilización de una estrategia pasiva.

8.2.2. Reducción de las temperaturas debida a la capa vegetal

Las figuras 8.7 y 8.8 muestran, respectivamente, la reducción de los picos de temperatura en la superficie exterior e interior de las fachadas debida a la capa vegetal. Dichas reducciones de los valores máximos indican el efecto de refrigeración debido a la vegetación. Durante el período de medición, la reducción de temperatura de los valores máximos en la superficie exterior varía entre 15.1 °C y 31.9 °C, siendo su valor medio 25.1 °C. Estos resultados

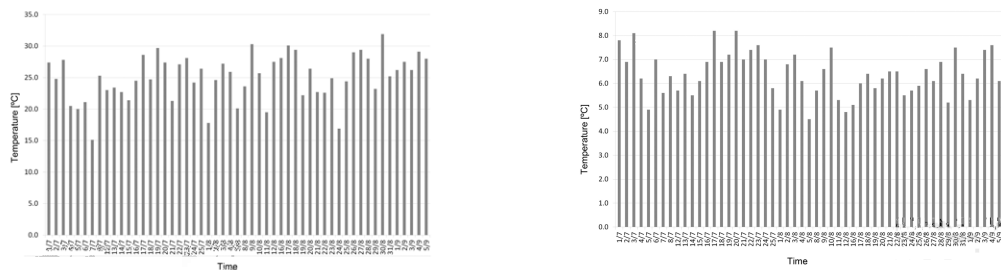


Figura 8.7: Reducción de los picos diarios de temperatura en la superficie exterior del cerramiento debido al efecto de la vegetación.

demuestran el impacto positivo de las fachadas vegetales en la reducción de la temperatura superficial de los edificios. Por otro lado, debido a las condiciones particulares del caso de estudio (clima del lugar, el período de medición, la orientación de la fachada, el tipo de sistema utilizados y las características de plantas y sustrato), no parece oportuno extrapolar dichos resultados a casos caracterizados por condiciones diferentes sin realizar antes los ajustes necesarios. En la superficie interior (figura 11) la diferencia entre los picos de temperatura registrados en el módulo sin vegetación y en el módulo con

vegetación disminuye respecto a la superficie exterior. Se dan oscilaciones entre 4.5°C y 8.2°C , siendo 6.4°C la temperatura media. Estas diferencias siguen siendo aún significativas.

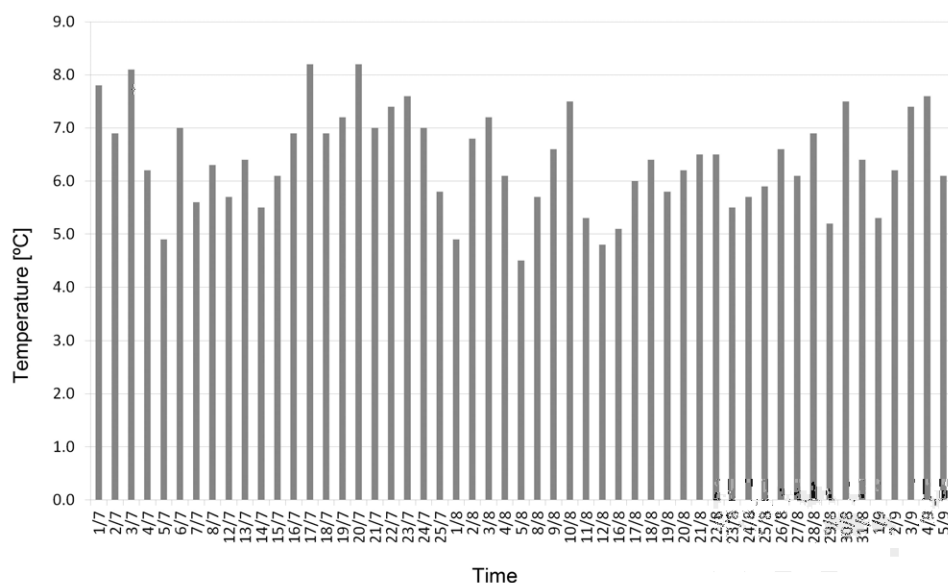


Figura 8.8: Reducción de los picos diarios de temperatura en la superficie interior del cerramiento debido al efecto de la vegetación.

Cabe destacar que la temperatura media en el módulo con vegetación es 4.1°C inferior a la temperatura en el módulo sin vegetación. Además, dicha temperatura se mantiene 1.5°C por debajo de la temperatura media en el exterior, mientras que en el módulo sin vegetación dicho valor supera en 2.6°C la temperatura media del aire exterior. Si se analizan las temperaturas medias diurnas y nocturnas, se observa cómo en ambos módulos la temperatura media es inferior a la temperatura media del aire exterior durante el día. En el módulo con vegetación esta diferencia es de 4.7°C , mientras que en el módulo sin vegetación se reduce sólo a 0.5°C . Respecto a las horas nocturnas,

Cuadro 8.2: Temperaturas medias del aire exterior e interior.

	Aire exterior	Módulo con vegetación	Módulo sin vegetación
T. media °C	25.1	23.6	27.7
T. media nocturna °C	21.9	23.7	27.9
T. media diurna °C	27.9	23.2	27.4

la temperatura media en el interior de los módulos es en ambos casos superior a la temperatura media del aire exterior. En el módulo con vegetación, la diferencia es de 1.8°C, mientras que el módulo sin vegetación alcanza 8°C (cuadro 8.2).

8.2.3. Desfase de la onda térmica en cada uno de los módulos

En este apartado se analiza el efecto de la vegetación en el retardo del pico de temperatura registrado en la superficie interior de la fachada respecto al pico máximo de temperatura registrado en la superficie exterior, que a su vez responde al pico máximo de irradiancia medida sobre superficie vertical. A tal efecto, dentro de todo el período de medición se escogen cuatro días a mediados del mes de julio y otros cuatro días a finales del mes de agosto, caracterizados por valores máximos de irradiancia comprendidos, en el primer caso, entre 497 W/(m² K) y 515 W/(m² K) y, en el segundo caso, entre 664 W/(m² K) y 773 W/(m² K) (figura 8.9).

Por otro lado, se eligen dos periodos con valores de irradiancia máximas dentro de rangos diferentes a fin de poder evaluar la influencia del valor de irradiancia en el desfase de la onda térmica. Como se puede observar en la

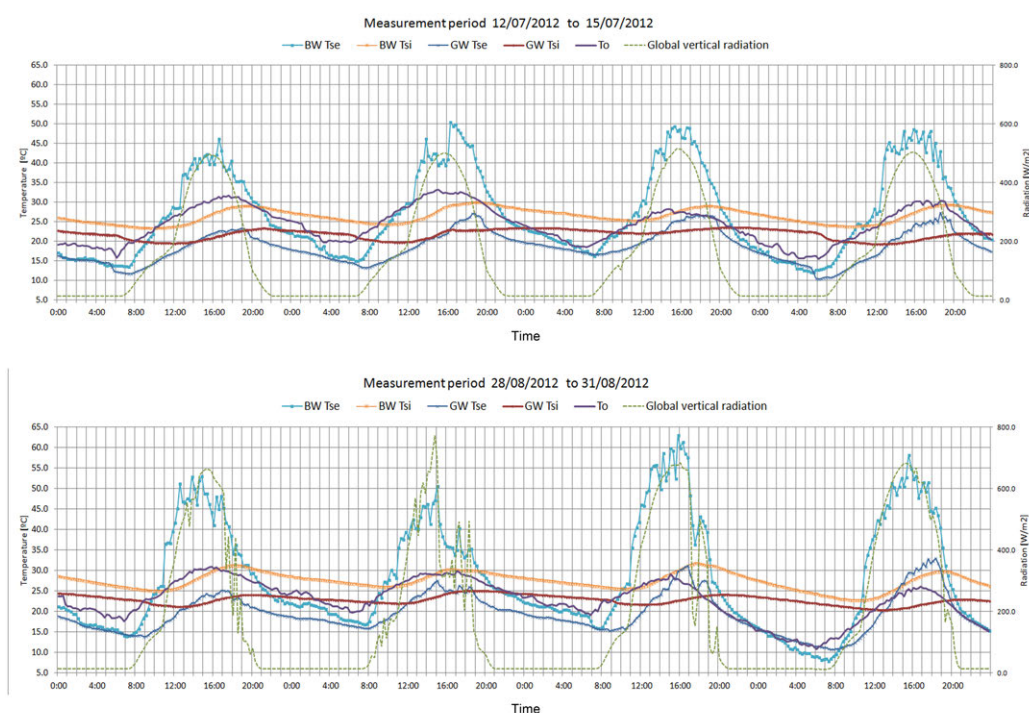


Figura 8.9: Valores de irradiancia y temperatura registrados desde el 12 hasta el 15 de julio (a) y desde el 28 hasta el 31 de agosto (b) en los dos módulos.

tabla 8.3, durante los días del mes de julio el pico máximo de irradiancia se registra entre las 15:30 h y las 15:45 h. Aproximadamente una hora más tarde se registra el pico máximo de temperatura en la superficie exterior de la fachada sin vegetación, mientras que las máximas temperaturas en la superficie exterior de la fachada vegetal se registran aproximadamente tres horas después del pico de radiación. Esto quiere decir que el efecto de sombreado debido a la vegetación retarda dos horas el pico de temperatura. Además, mientras las temperaturas superficiales en la fachada desnuda rondan los 50 °C, las temperaturas de la fachada vegetal alcanzan como máximo los 27 °C. Este efecto se refleja en las temperaturas medidas en la superficie

Cuadro 8.3: Picos de irradiancia sobre superficie vertical orientada a sur y temperaturas superficiales máximas en las superficies exteriores (Tse, max) e interiores (Tsi, max) de los dos módulos registrados cada día. El primer dígito indica la hora y el segundo (entre paréntesis) el valor.

	Rad. max [W/(m ² K)]	BW Tse, max [°C]	BW Tsi, max [°C]	GW Tse, max [°C]	GW Tsi, max [°C]
12/07	15:30 h (497.1)	16:30 h (46.3)	19:00 h (29)	19:00 h (23.3)	21:00 h (23.3)
13/07	15:30 h (500.9)	16:15 h (50.5)	18:30 h (29.9)	18:30 h (27.1)	21:00 h (23.5)
14/07	15:30 h (515.2)	15:15 h (49.4)	18:15 h (29)	18:30 h (26.7)	21:00 h (23.5)
15/07	15:45 h (503.8)	14:45 h (48.7)	19:15 h (29.4)	18:30 h (27.3)	21:00 h (22.0)

interior. Mientras en el módulo sin vegetación los valores están aproximadamente alrededor de 29 °C, en el módulo con vegetación oscilan entre 22 °C y 23.5 °C. Asimismo, el retardo de la onda térmica debido a la vegetación causa que los picos en el módulo vegetal se registren entre las 20:30 h y las 21:00 h, aproximadamente dos horas más tarde que el otro módulo. También cabe destacar que la temperatura en la superficie interior de la fachada vegetal es bastante más estable que la temperatura en la superficie interior de la fachada sin vegetación. Observando la temperatura exterior en el momento en el que se producen los picos máximos en la temperatura superficial interior, se nota cómo entre las 18:30 h y las 19:00 h (momento de pico en la fachada sin vegetación) la temperatura exterior ronda los 30 °C y cómo a las dos horas siguientes se registra una bajada importante, que conlleva valores próximos a 25 °C entre las 20:30 h y 21:00 h. Estas diferencias cobran especial importancia de cara a la aplicación de fachadas vegetales en edificios. Las condiciones reales de uso de un edificio suponen tanto cargas internas como

Cuadro 8.4: Picos de irradiancia sobre superficie vertical orientada a sur y temperaturas superficiales máximas en las superficies exteriores (Tse, max) e interiores (Tsi, max) de los dos módulos registrados cada día. El primer dígito indica la hora y el segundo (entre paréntesis) el valor.

	Rad. max [W/(m ² K)]	BW Tse, max [°C]	BW Tsi, max [°C]	GW Tse, max [°C]	GW Tsi, max [°C]
28/08	15:15 h (664.1)	14:45 h (53.1)	17:45 h (31.3)	16:45 h (25.1)	19:00 h (24.1)
29/08	14:45 h (773.0)	15:00 h (50.7)	16:00 h (30.3)	15:00 h (27.5)	18:00 h (25.1)
30/08	16:00 h (684.2)	15:45 h (63.1)	17:30 h (31.8)	16:45 h (31.2)	20:00 h (24.1)
31/08 h	15:15 h (682.8)	15:30 h (58.2)	18:00 h (29.9)	18:15 h (33.0)	20:00 h (22.8)

cargas por radiación y transmisión a través de las superficies, haciendo que las temperaturas que se registran en el interior sean significativamente más altas que las registradas en los módulos experimentales. Bajo estas condiciones, en el caso del edificio con fachada vegetal se podría tomar ventaja de la ventilación natural para refrescar durante las horas de máxima temperatura interior. En el caso de la fachada sin vegetación esto no sería posible, ya que en el momento de pico de temperatura interior, la temperatura exterior es superior a la temperatura de confort. Como se puede observar en el cuadro 8.4, debido a los altos valores de irradiancia, las temperaturas superficiales exteriores e interiores durante los cuatro días de agosto son más altas que las registradas durante el mes de julio.

Además, se observa cómo el desfase entre el pico de irradiancia vertical y el pico de temperatura superficial exterior se reduce respecto al caso anterior tanto en la fachada desnuda como en la vegetal. Por otro lado, los datos resultan ser mucho más variables, siendo imposible asignar un valor fijo de

desfase. No obstante, el comportamiento de la fachada vegetal sigue siendo muy bueno, notándose diferencias respecto de los picos de temperatura superficial registrados en la fachada sin vegetación que oscilan entre 23 °C y 32 °C en la superficie exterior y, entre 1 °C y 10 °C, en la superficie interior de los módulos. El 29 de agosto, día que registra un valor máximo anómalo de irradiancia sobre superficie vertical, se observa cómo los picos de temperatura superficiales exteriores en ambas fachadas se dan al mismo tiempo y tan sólo un cuarto de hora más tarde respecto del pico de irradiancia.

A pesar de estas condiciones tan extremas, el comportamiento de la fachada vegetal sigue ofreciendo efectos positivos. Por un lado, se detecta un desfase de 3 horas entre el pico de temperatura registrado en la superficie exterior y el pico registrado en la superficie interior. Por otro lado, la temperatura superficial interior en el módulo con vegetación resulta ser 5 °C más baja que la temperatura superficial interior en el módulo sin vegetación. Cabe destacar cómo la capa vegetal sigue actuando como elemento amortiguador bajo condiciones de irradiancia, siendo en el caso de la fachada sur propias de climas más cálidos que el analizado.

8.2.4. Gradiente térmico de los dos cerramientos

A lo largo de esta sección se analizan en detalle las temperaturas registradas en las diferentes capas de los dos cerramientos bajo las mismas condiciones exteriores, comparando lo que ocurre a la vez en la fachada vegetal y en la testigo. El objetivo es estudiar cómo evoluciona el comportamiento de la capa vegetal al variar las condiciones externas. Para realizar dicho análisis

se han escogido 24 horas consecutivas comprendidas entre el 30 y el 31 de agosto, analizando los datos cada 4 horas. La figura 8.10 muestra cómo du-

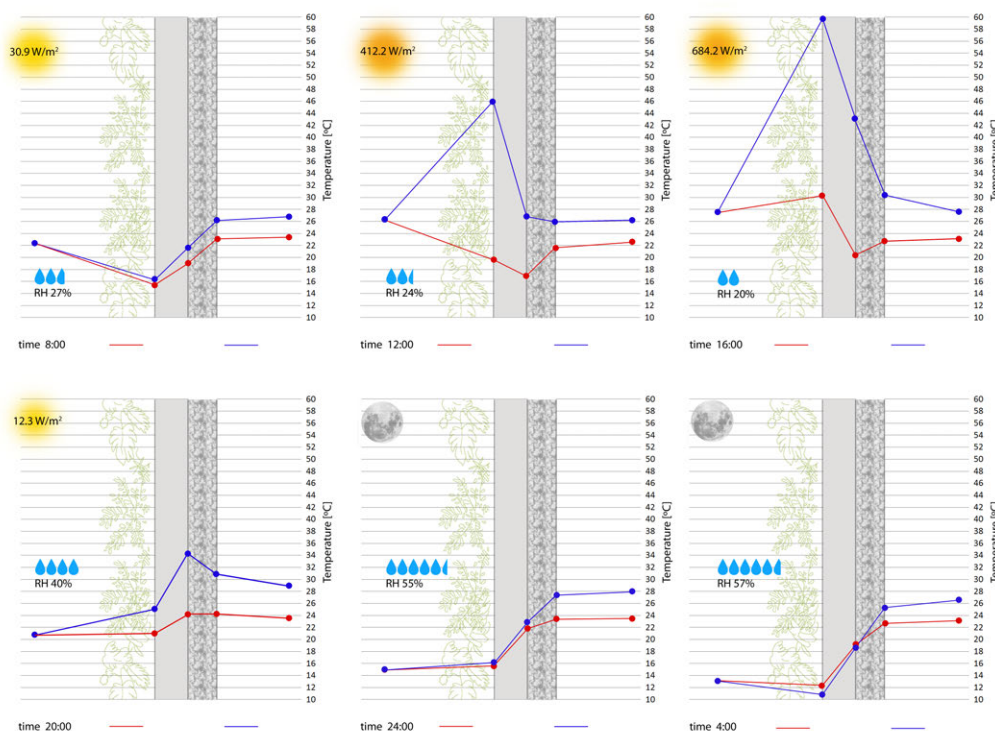


Figura 8.10: Radiación, temperatura del aire y humedad relativa registradas en diferentes momentos de los días 30 y 31 de agosto de 2012; temperaturas registradas en diferentes puntos del módulo sin vegetación (línea azul) y del módulo con vegetación (línea roja).

durante la noche y la mañana las temperaturas superficiales exteriores de las dos fachadas prácticamente coinciden, dándose casos en los que la temperatura superficial de la fachada con vegetación es superior a la temperatura superficial de la fachada sin vegetación. Esto es debido probablemente a que la capa de vegetación durante la noche protege la superficie que se encuentra justo detrás de ella, dificultando la re irradiación desde la superficie hacia la bóveda celeste. Aún así, debido probablemente a que el sustrato del panel de

la fachada vegetal es húmedo a diferencia del substrato seco del panel de la fachada sin vegetación, la termoresistencia situada entre el panel y el aislante registra en el módulo con vegetación valores inferiores respecto al módulo sin vegetación. Esto provoca que durante la noche las temperaturas registradas en el interior del módulo con vegetación sean inferiores a las temperaturas registradas en el otro módulo. En cualquier caso, es durante el día cuando se notan los efectos más significativos de la fachada vegetal. A las 12:00 de la mañana, con una temperatura del aire de 26 °C, la temperatura superficial exterior de la fachada vegetal es inferior a 20 °C, mientras que la temperatura en la otra fachada alcanza los 46 °C. A las 16:00 h, bajo una irradiancia sobre superficie vertical de 680 W/m², la temperatura superficial exterior de la fachada vegetal es sólo 3 °C superior a la temperatura del aire, mientras que la superficie de la otra fachada alcanza los 60 °C. La baja humedad relativa (inferior al 25 %) que se registra durante esas horas del día posibilita que la evapotranspiración de las plantas funcione perfectamente y sea muy efectiva. Este efecto, junto con el sombreado proporcionado por las plantas, permite que la temperatura registrada al interior del módulo con vegetación en las horas más cálidas del día, sea aproximadamente 5 °C inferior a la temperatura registrada en el módulo sin vegetación. Esto nos permite concluir que a pesar de la elevada resistencia térmica del cerramiento, el efecto de la vegetación sigue siendo muy positivo, sobre todo en las horas más cálidas del día. El efecto se sigue notando en las últimas horas de la tarde, cuando la temperatura superficial exterior de la fachada vuelve a coincidir con la temperatura del aire.

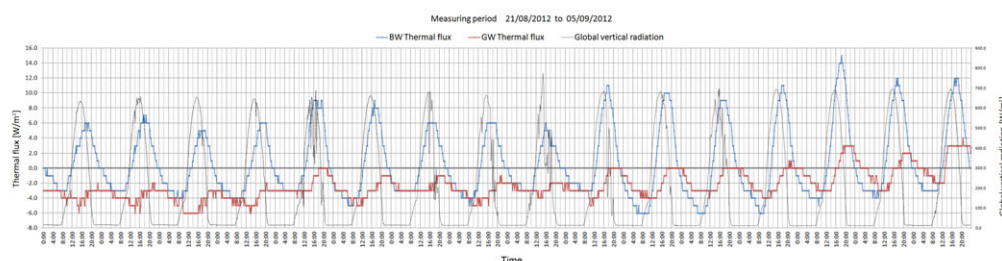


Figura 8.11: Radiación sobre superficie vertical orientada a sur y flujos térmicos registrados en la cara interior de los dos módulos.

8.3. Flujo de calor

Durante el período comprendido entre el 21 de agosto y el 5 de septiembre se instalan dos fluxímetros en la superficie interior de las dos fachadas con el objetivo de medir el flujo térmico que atraviesa ambos cerramientos.

Según la configuración de los dos aparatos, los valores de flujo positivos representan el flujo entrante y los valores de flujo negativos, el flujo que se dirige hacia el exterior del módulo. En primer lugar, cabe destacar que existe un desfase temporal (figura 8.11) entre las condiciones climáticas externas y los flujos térmicos que entran en el edificio. El pico máximo de irradiancia sobre superficie vertical se registra en la mayoría de los casos entre las 15:00 h y las 16:00 h.

Sin embargo, el pico máximo de flujo entrante se registra aproximadamente entre 2 y 3 horas más tarde en la fachada testigo, y entre 5 y 6 horas más tarde en la fachada con vegetación. Además, se nota cómo hay una alternancia constante de flujos positivos y negativos en el cerramiento sin vegetación, mientras que en el caso del cerramiento con acabado vegetal los flujos ne-

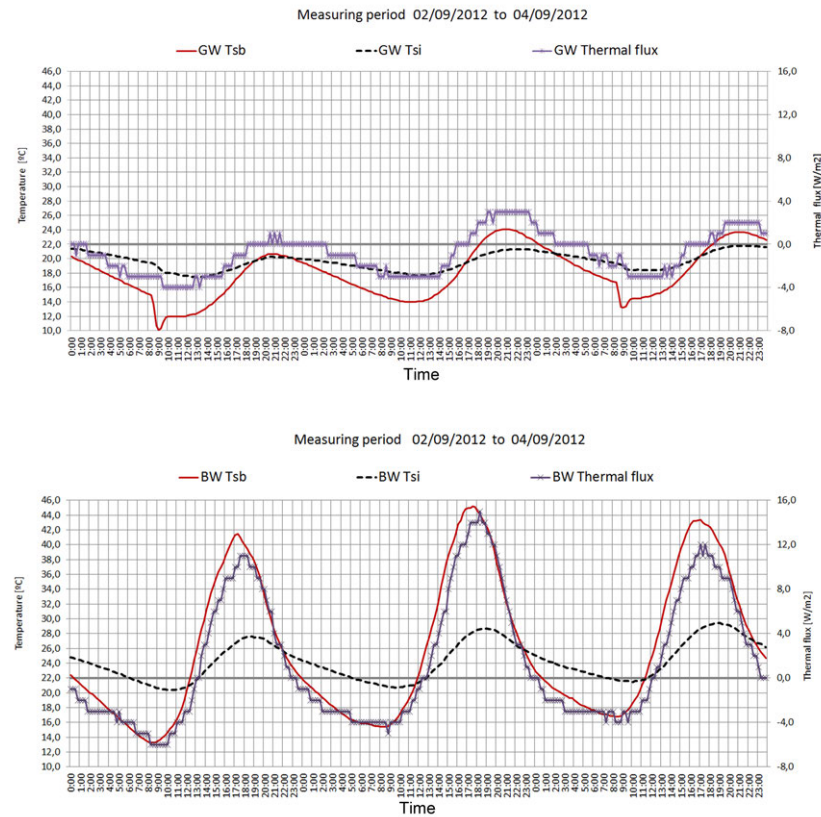


Figura 8.12: Temperatura superficial del cerramiento al interior del módulo (Tsi), temperatura superficial del cerramiento entre el aislante y el panel (Tsb) y flujo térmico registrados en los dos módulos durante tres días tipo.

gativos se dan muchas más veces que los flujos positivos. Este fenómeno se puede explicar analizando las temperaturas del aire y la temperatura superficial al interior de los dos módulos. A partir de la figura 8.12, se observa una correspondencia directa entre la diferencia de temperatura superficial del cerramiento al interior del módulo (Tsi) y la temperatura superficial del cerramiento entre el aislante y el panel (Tsb) y la dirección del flujo de calor.

Cuando $T_{si} > T_{sb}$, el flujo de calor se dirige hacia el exterior ($TF < 0$); al contrario de lo que ocurre cuando $T_{sb} > T_{si}$, donde el flujo se dirige

hacia el interior del módulo ($TF > 0$). Esto ocurre tanto en el cerramiento sin vegetación (BW) como en el cerramiento con vegetación (GW). Debido a los efectos de sombreamiento y evapotranspiración de la vegetación, la superficie exterior del módulo con vegetación mantiene temperaturas muy bajas en comparación con el otro módulo. En consecuencia, las temperaturas interiores son a su vez más bajas. Este efecto provoca que en la mayoría de los casos en el módulo vegetal la temperatura superficial del cerramiento, entre el aislante y el panel (GW, T_{sb}), sea inferior a la temperatura superficial del cerramiento al interior del módulo (GW, T_{si}). Es por esta razón que el fluxímetro posicionado en la cara interior de la fachada registra un flujo que se dirige hacia el exterior. Para estimar la energía correspondiente a los flujos entrantes y salientes de los módulos experimentales a través de las dos fachadas en el periodo de tiempo analizado, se calculan las áreas multiplicando el flujo instantáneo por el intervalo de tiempo. El intervalo de tiempo considerado ha sido 15 minutos. Para cada intervalo el área del trapecio se ha calculado considerando como altura 900 segundos y como bases, los valores de flujos correspondientes a dos medidas consecutivas. Todas las áreas de los trapecios y los triángulos inicial y final de cada campana se han sumado para obtener el área total. El área positiva indica la energía por metro cuadrado que entra en los módulos a través de las fachadas, mientras que el área negativa indica la energía por metro cuadrado que penetra en los cerramientos (cuadro 8.5).

Los resultados demuestran que en el módulo con vegetación la energía entrante representa aproximadamente el 7 % de la correspondiente al módulo sin vegetación. Además, si se compara la energía entrante y saliente en ambos

Cuadro 8.5: Energía correspondiente a los flujos entrantes y salientes de los módulos a través del cerramiento con vegetación y del cerramiento sin vegetación.

Period	Bare wall		Green wall	
	Energy entering [W h/m ²]	Energy stored [W h/m ²]	Energy entering [W h/m ²]	Energy stored [W h/m ²]
21/08 - 05/09	837.5	-582.2	61.8	-952.1

módulos, se nota cómo en el módulo con vegetación la energía entrante sólo es el 6.5 % de la energía saliente, mientras que en el módulo sin vegetación la energía entrante es superior a la energía saliente, representando un 144 % de esta última.

8.4. Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que, a pesar de la elevada resistencia térmica del cerramiento, el efecto de la vegetación es muy positivo, sobre todo en las horas más cálidas del día. Además, las fachadas vegetales se pueden utilizar como estrategia de enfriamiento pasivo, incluso en cerramiento aislados.

El estudio demuestra que la instalación de fachadas vegetales en edificios supone un descenso de la temperatura operativa de los mismos, favoreciendo el confort de los usuarios. La temperatura superficial interior máxima registrada en el cerramiento vegetal es en media 5 °C inferior a la temperatura superficial interior máxima registrada en el cerramiento sin vegetación. La temperatura superficial interior mínima es significativamente inferior a la registrada en el módulo sin vegetación, situándose en la mayoría de los casos

por debajo de los 25 °C. Como resultado de las menores temperaturas superficiales registradas en el módulo con vegetación, la temperatura del aire en el interior es en media 4 °C inferior a la temperatura del aire en el módulo sin vegetación.

Además, el desfase de la onda térmica provocado por la vegetación, de aproximadamente dos horas, permite que el pico máximo de temperatura en el módulo con vegetación se registre cuando la temperatura del aire en el exterior se encuentra en el rango de confort, posibilitando el aprovechamiento de la ventilación natural para refrescar durante las horas de máxima temperatura interior. En el caso de la fachada sin vegetación, este hecho resultaría imposible, ya que en el momento de pico de temperatura interior, la temperatura exterior es superior a la temperatura de confort.

Asimismo, el análisis del flujo térmico que atraviesa las dos fachadas demuestra que las bajas temperaturas registradas en la superficie exterior de la fachada vegetal permiten que el flujo de calor saliente del módulo sea superior al flujo de calor entrante. Por tanto, el módulo con vegetación se enfría progresivamente, mientras que el módulo sin vegetación se calienta progresivamente.

En general, incorporar acabados vegetales constituidos por plantas y sustrato en las fachadas de edificios situados en climas mediterráneo continentales parece ser beneficiosa tanto para la disminución del consumo energético de refrigeración como para la mejora de las condiciones de confort de los usuarios.

Capítulo 9

Desarrollo e validación de un modelo de predicción del comportamiento térmico del cerramiento vegetal

Una vez verificado que la utilización de elementos vegetales en cerramientos verticales es favorable tanto en verano como en invierno incluso utilizando cerramientos aislados, se procede a desarrollar un modelo predictivo del comportamiento térmico de las fachadas vegetales. Parece más lógico trabajar sobre un modelo del comportamiento de la vegetación existente en lugar de desarrollar uno nuevo desde cero. Además, dado que no existen modelos válidos para el estudio de fachadas vegetales, se considera oportuno trabajar sobre un modelo de cubiertas y, posteriormente, adaptarlo a fachadas. De los modelos existentes para la simulación de cubiertas verdes se elige el modelo

Ecoroof del programa Energy Plus por ser el más completo.

9.1. Análisis de sensibilidad del Modelo Ecoroof

Se desarrolla un análisis de sensibilidad con el modelo Ecoroof del programa Energy Plus a fin de verificar la dependencia del flujo y de la resistencia térmica de la cubierta vegetal sobre las variables características del modelo para la zona climática de Ancona (Italia).

El programa de simulación Energy Plus requiere que las simulaciones se realicen en un lugar concreto, utilizando los datos climáticos específicos del lugar. En este trabajo se ha elegido la zona climática de Ancona, por ser la localidad donde se encuentra un edificio experimental con cubierta ecológica, cuya monitorización será necesaria para verificar la fiabilidad del modelo numérico.

La resistencia térmica de la cubierta vegetal es el cociente entre el promedio de las diferencias entre la temperatura sol-aire y la temperatura interior y la media entre los flujos entrantes en verano.

$$R = \frac{\Delta T}{Q} \quad (9.1)$$

Se ha tomado un coeficiente de absorción solar de 0.85 para obtener el valor medio de la temperatura sol-aire. Para estimar la incertidumbre en la determinación de R debido a la variación del coeficiente de absorción solar, desarrollamos las simulaciones con los valores de absorción solar que variaban

entre el valor inicial $\pm 0,05$ y el valor inicial $\pm 0,10$. Registramos una variación en el valor medio de la resistencia térmica que oscilaba entre el valor inicial $\pm 3\%$ y el valor inicial $\pm 8\%$.

Se empleó un análisis de sensibilidad previo mediante el modelo Ecoroof del programa Energy Plus v7-0 para identificar las variables que afectan a las ganancias de calor a través de la cubierta vegetal a lo largo del verano. Las dimensiones del edificio empleado para las simulaciones son 100 m x 100 m x 6 m. Sus características principales aparecen resumidas en las Tablas 4, 5 and 6. Las variables analizadas y el valor por defecto para cada una de ellas se enumeran en la Tabla 7.

Las simulaciones se realizaron en verano, entre el 1 de junio y el 30 de septiembre, y se tomaron cargas de 20 W/m^2 constantes durante el día y la noche.

El primer paso realizar una simulación preliminar con todas las variables por defecto para determinar la ganancia térmica correspondiente a la cubierta ecológica con todas las variables por defecto. A continuación se hacen dos simulaciones para cada variable, dando a la variable el valor máximo y mínimo que el programa permite y dejando las variables restantes con sus valores por defecto. Se obtiene un valor de energía para cada simulación. Los resultados se compararon con el valor obtenido a partir de los valores por defecto de todas las variables: una variación de menos del 10 %, comparado con el valor por defecto, se consideró no relevante para el estudio. El procedimiento descrito se resume en la figura 9.1.

El eje en la parte izquierda del gráfico 9.2 muestra los valores absolutos de la ganancia térmica obtenida para cada simulación. El eje la parte derecha

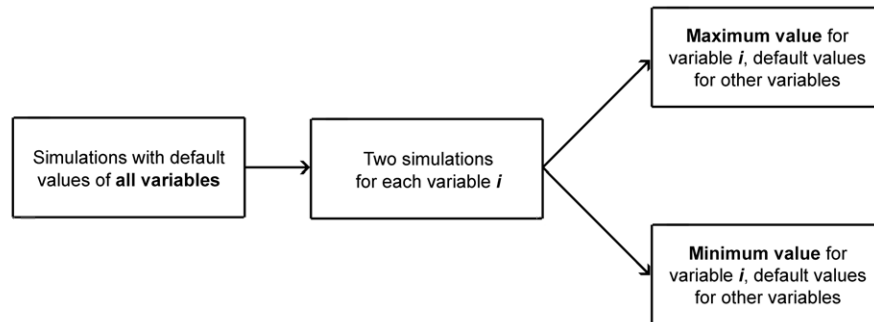


Figura 9.1: Método utilizado en las simulaciones: se halla la ganancia térmica de la cubierta para un valor máximo y mínimo de cada variable, dejando las otras variables por defecto. Estos valores se comparan después con el valor obtenido tras emplear todas las variables por defecto.

del gráfico muestra, en porcentaje, los valores relativos respecto del valor obtenido con todas las variables por defecto, el cual se considera 100 %.

Los resultados muestran que, para la zona climática de Ancona, las únicas variaciones energéticas superiores al 10 %, comparadas con los valores obtenidos con los valores por defecto de todas las variables, corresponden a cuatro variables:

- índice de area foliar (lai);
- altura de las plantas (hp);
- conductividad del sustrato seco (λ);
- resistencia estomática mínima (msr).

Por tanto, se puede deducir que durante el verano las ganancias térmicas a través de la cubierta vegetal dependen del valor de estas cuatro variables; consecuentemente las otras variables no son relevantes (Figura 9.2).

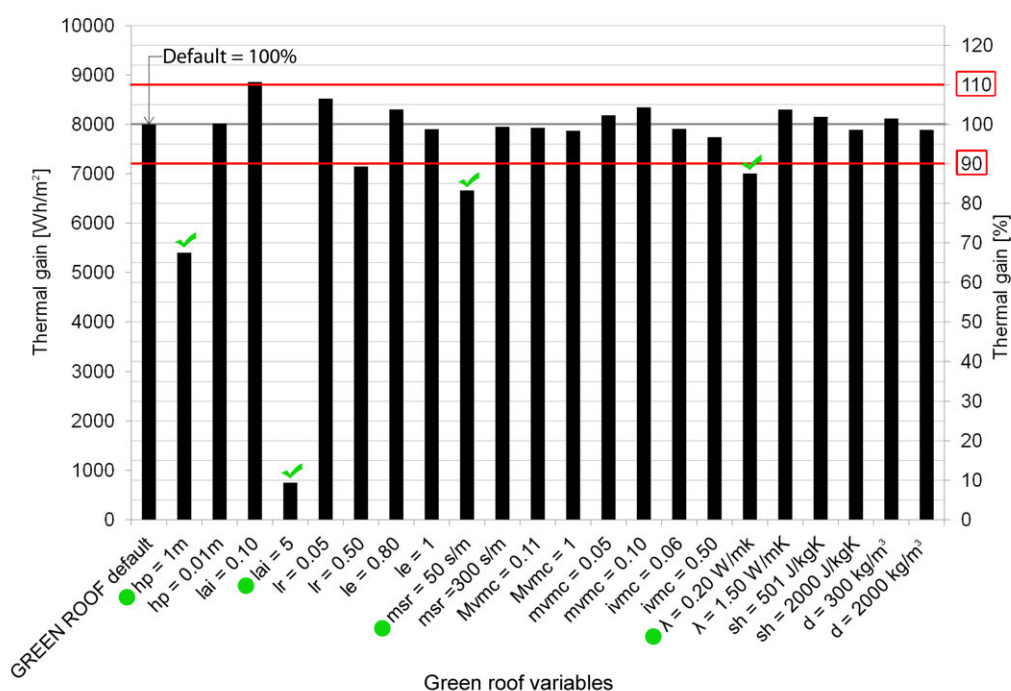


Figura 9.2: Resultados del análisis de sensibilidad empleando el modelo Eco roof para estudiar la dependencia de la ganancia térmica sobre las variables características del modelo para la zona climática de Ancona.

Un análisis detallado de las ganancias térmicas a través de la cubierta como resultado de las variaciones en msr muestra que el valor es casi constante para valores de msr por encima de 75 s/m. Las únicas variaciones importantes se dan para valores entre 50 y 75 s/m (Fig. 9.3).

Teniendo en cuenta que la vegetación que generalmente se emplea en las cubiertas ecológicas tiene valores de msr superiores a 100 s/m, no pareció oportuno considerar relevante ninguna variación de ganancia térmica a través de la cubierta correspondiente a valores de msr menores de 75 s/m y, por lo tanto, se excluyó esta variable del análisis.

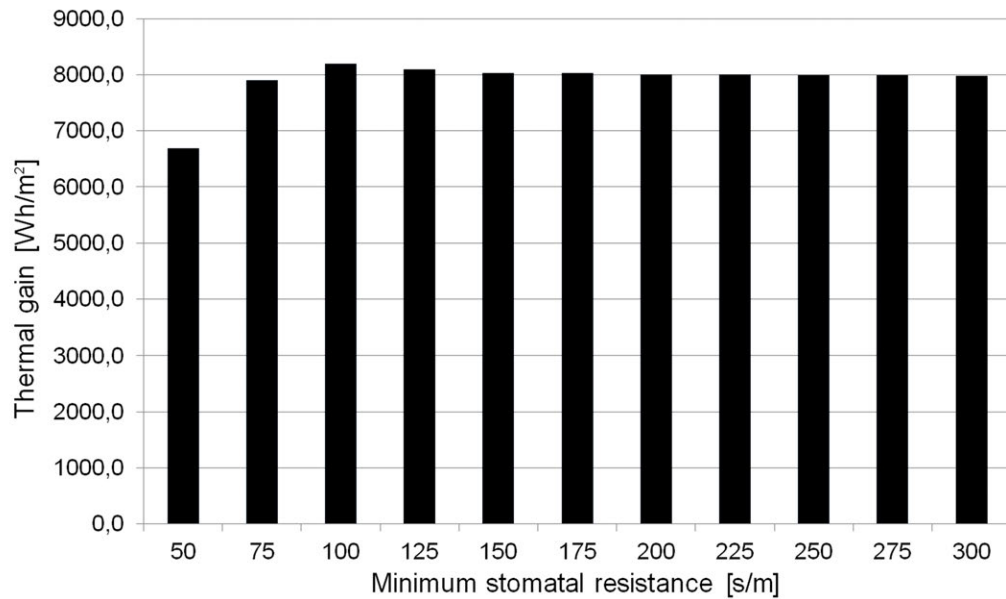


Figura 9.3: Variación de la ganancia térmica con variaciones en “msr” (resistencia estomática mínima). Sólo se observan variaciones en la ganancia térmica para $0,5 \leq msr \leq 0,75s/m$.

A continuación, se evalúo la dependencia de la ganancia térmica de las tres variables elegidas. Se realizaron simulaciones para cada variable con diferentes valores dentro del rango de valores posibles, teniendo todas las variables valores por defecto. Para cada grupo de simulaciones se obtiene un gráfico que representa la variación en la ganancia térmica de la variable estudiada

9.2. Resistencia térmica de sustrato y vegetación

El flujo entrante promedio se calcula dividiendo el flujo entrante entre la unidad de tiempo. Para poder escribir la ecuación $R = \frac{\Delta T}{Q}$ se obtuvo la

diferencia entre la temperatura exterior y la temperatura interior en función de las variables elegidas. Basándonos en el análisis en estado casi estacionario, las resistencias térmicas de la vegetación y del sustrato han sido calculadas como valores promedios estacionales. La radiación y la evapotranspiración son fenómenos muy dinámicos, caracterizados por frecuencias más elevadas que las ondas térmicas que atraviesan la cubierta debido a las diferencias de temperatura.

El método de cálculo estacional en estado casi estacionario se concibe para prescindir de los fenómenos que ocurren con mucha frecuencia. Sin embargo, la radiación solar ha sido considerada globalmente, utilizando la temperatura sol-aire, mientras que la evapotranspiración se ha considerado teniendo en cuenta su efecto sobre la reducción de la temperatura superficial exterior de la vegetación.

La resistencia térmica total es el sumatorio de las resistencias térmicas conocidas de las capas de la cubierta y las resistencias superficiales, a las cuales se suman la resistencia térmica del sustrato y la resistencia térmica equivalente de la vegetación. Ni la resistencia térmica de las capas conocidas de la cubierta ni la resistencia superficial interna se ven afectadas por el tipo de vegetación y sustrato, a diferencia de lo que ocurre con la resistencia térmica del sustrato, la resistencia térmica equivalente de la vegetación y la resistencia superficial externa.

La resistencia térmica superficial exterior y la resistencia térmica equivalente de la vegetación se tratan como un único elemento y se les asigna un valor único que tiene en cuenta ambos valores. Para calcular este valor, se considera la temperatura sol-aire como temperatura exterior, y la tempera-

tura superficial del sustrato como temperatura interior.

La resistencia térmica del sustrato es, por otro lado, calculada como diferencia entre la resistencia térmica obtenida, tomando la temperatura superficial del sustrato como temperatura exterior y la temperatura superficial de la superficie interior de la cubierta como temperatura interior, y las resistencias térmicas conocidas de la capas de la cubierta por debajo del sustrato. En ambos casos, el valor de flujo considerado era el medido en la superficie interior de la cubierta.

El procedimiento para calcular la resistencia térmica, basado en el cociente entre los valores promedio de las diferencias de temperatura y de flujo entrante calculado durante el verano, se verificó comparando los resultados obtenidos empleando este método y aquellos derivados de la aplicación del método del sumatorio de las resistencias. Como ejemplo, se simuló la cubierta durante el verano sin el sustrato y la vegetación, asignando las propiedades ópticas de la vegetación a la capa más externa del material. A partir de los resultados de la simulación, se calcularon el promedio de las diferencias de temperatura y el promedio del flujo entrante a través de la cubierta. De este modo, se obtuvo un valor de resistencia térmica que coincidía con el valor obtenido por medio del cálculo de las resistencias térmicas como sumatorio de las resistencias de las distintas capas de la cubierta. En ambos casos, la resistencia térmica de la cubierta estudiada era $2.59 \text{ m}^2\text{K/W}$.

Tal y como ocurre con el flujo entrante, las temperaturas también varían según varíen las variables características del modelo. Por este motivo, se realizó otro estudio de sensibilidad considerando, en este caso, que las variables de control no eran la única diferencia entre la temperatura sol-aire y la

temperatura superficial exterior del sustrato, pero también la diferencia entre la temperatura superficial exterior del sustrato y la temperatura superficial en la superficie interior de la cubierta. Este estudio se realizó para valores de lai característicos de cubiertas vegetales extensivas, limitando, por tanto, el rango de valores $1 \leq lai \leq 4$. La temperatura sol-aire se considera constante, ya que en todos los casos el sustrato se encuentra totalmente cubierto de vegetación. A partir del análisis, se puede deducir que los parámetros característicos más relevantes para las variables de control son LAI y HP.

Para valores de $lai \geq 2$, la resistencia térmica equivalente de la vegetación aumenta cuando lai también aumenta, y cuando lai permanece constante, esta resistencia es mayor para valores menores de hp . Para valores de $lai \leq 2$, se nota un cambio de tendencia en el gráfico (Figura 9.4).

Como la diferencia entre el promedio de las temperaturas superficiales exteriores ($T_{se,mean}$) y el promedio de las temperaturas superficiales en la superficie interior ($T_{si,mean}$) de la cubierta desciende según el lai aumenta y la resistencia térmica de todas las capas de la cubierta, excluyendo las correspondientes al sustrato y la vegetación, es constante ($2.59 \text{ m}^2\text{K/W}$), la resistencia térmica del sustrato (R_{su}), obtenido como la diferencia entre R_{tot} y R_{st} , desciende cuando el lai aumenta, permaneciendo casi constante para valores de $lai < 1,6$, mientras que no se observa una tendencia clara respecto de la variable hp (Fig. 9.5 a y b).

Ésto se puede explicar por el hecho de que los valores elevados de lai implican una capa más gruesa de vegetación que supone un sustrato más húmedo y el resultante incremento en la conductividad térmica asociada.

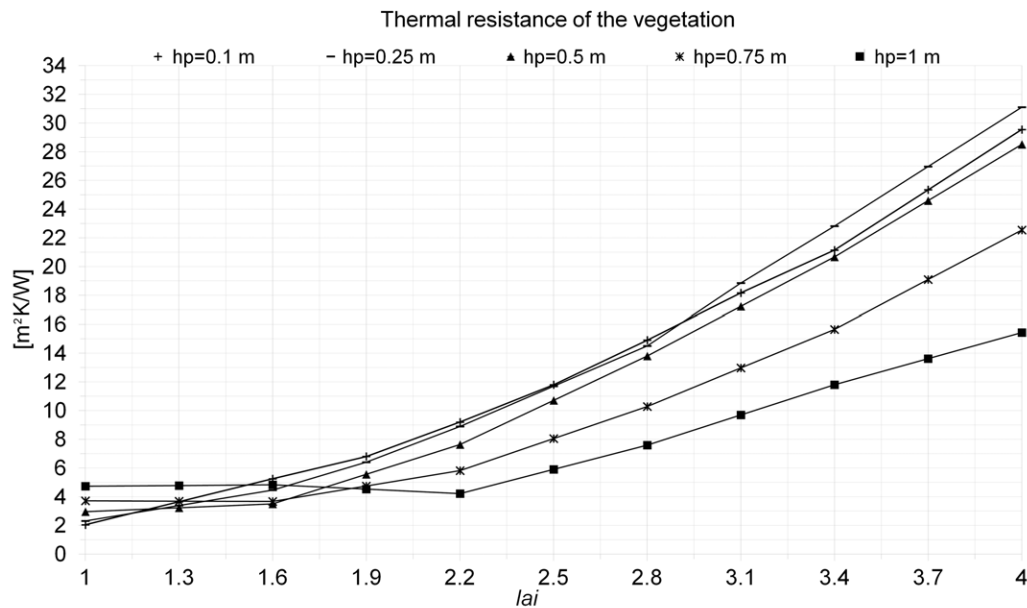


Figura 9.4: Resistencia térmica equivalente de la vegetación con en función del “lai” (índice de área foliar) para los diferentes valores de “hp” (altura de las plantas).

9.3. Ajuste de un modelo simplificado para cubiertas

9.3.1. Modelo del flujo térmico

Tras analizar los resultados (Figura ??), es evidente que lai es el parámetro de mayor influencia y, por tanto, este parámetro es la base para el modelo simplificado del edificio para la simulación de la cubierta vegetal. Primero, se realiza el modelo de la ganancia térmica y sólo después se desarrolla el modelo de la resistencia térmica.

Se emplea el programa comercial MATLAB 7.8.0 (R2009a), más en con-

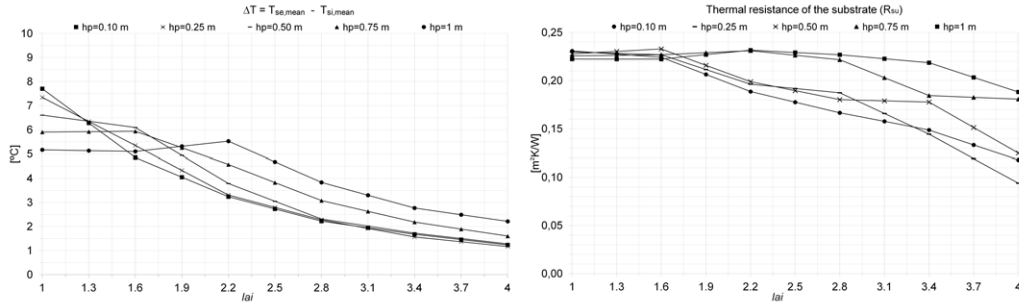


Figura 9.5: 10a: diferencia entre el promedio de las temperaturas superficiales exteriores y el promedio de las temperaturas superficiales en la superficie interior de la cubierta como función de “ lai ” (índice de área foliar) para diferentes valores de “ hp ” (altura de las plantas). 10b: resistencia térmica del sustrato con en función del “ lai ” (índice de área foliar) para diferentes valores de “ hp ” (altura de las plantas)

creto la aplicación “cftool”.

El primer paso es obtener la ecuación de lai que identifica la gráfica de simulaciones desarrollado mediante el programa Energy Plus. A continuación, se realizan correcciones en la ecuación a partir de los valores derivados de HP and λ .

$$E(lai, hp, \lambda) = E(lai) + E(hp) + E(\lambda) \quad (9.2)$$

El gráfico de la función $E(lai)$ (Fig. ??) claramente muestra que para $lai = 1,12$ la tendencia del gráfico es a variar. Por este motivo, el estudio se realizó en dos fases, a través de un estudio previo del gráfico para valores de $0 \leq lai \leq 1,12$ y posteriormente para valores de $1,12 < lai \leq 5$.

En ambos casos, la ecuación que de forma más precisa reproduce la gráfica obtenida a partir de la simulaciones es la exponencial del tipo $E(x) = ae^{bx} +$

ce^{dx}

En cada caso, los coeficientes toman valores diferentes. Para $0 \leq lai \leq 1,12$, $a= 957.4$, $b= -2.448$, $c= 8225$ and $d= -0.03231$ y, por tanto, la ecuación queda del siguiente modo:

$$E_{1,1} = 957,4e^{-2,448lai} + 8225e^{-0,03231lai} \quad (9.3)$$

Para $1,12 < lai \leq 5$, $a= 19270$, $b= -1.086$, $c= 3388$ and $d= -0.3138$ y, por tanto, la ecuación queda:

$$E_{1,2} = 19270e^{-1,086lai} + 3388e^{-0,3138lai} \quad (9.4)$$

Una vez obtenida la ecuación de ganancia térmica en función de LAI, se corrige con los valores derivados de HP y λ . Analizando el gráfico $E(lai)$ para diferente valores de hp (Fig. 9.6) se observa cómo las tendencias de los gráficos son muy similares. Por este motivo, el gráfico se dividió en 4 regiones correspondientes a los cambios de tendencia y cada región se analizó del mismo modo.

Región $0 \leq lai \leq 1,12 \forall hp$. Esta parte del gráfico muestra que para cada sector los incrementos en los valores respecto a $hp = 0.1$ m, que es el valor por defecto, son casi idénticos. Por tanto, es posible calcular el promedio de las diferencias entre el valor $hp = 0.1$ m y los valores de $hp \neq 0.1$ m. Si observamos estos valores, a excepción de la primera línea de la tabla correspondiente a $lai=0.01$, podemos ver que son muy similares entre ellos. Por tanto, calculando el promedio de las diferencias podemos obtener un valor que permite que la función sea aproximada, sin errores significativos (Tabla

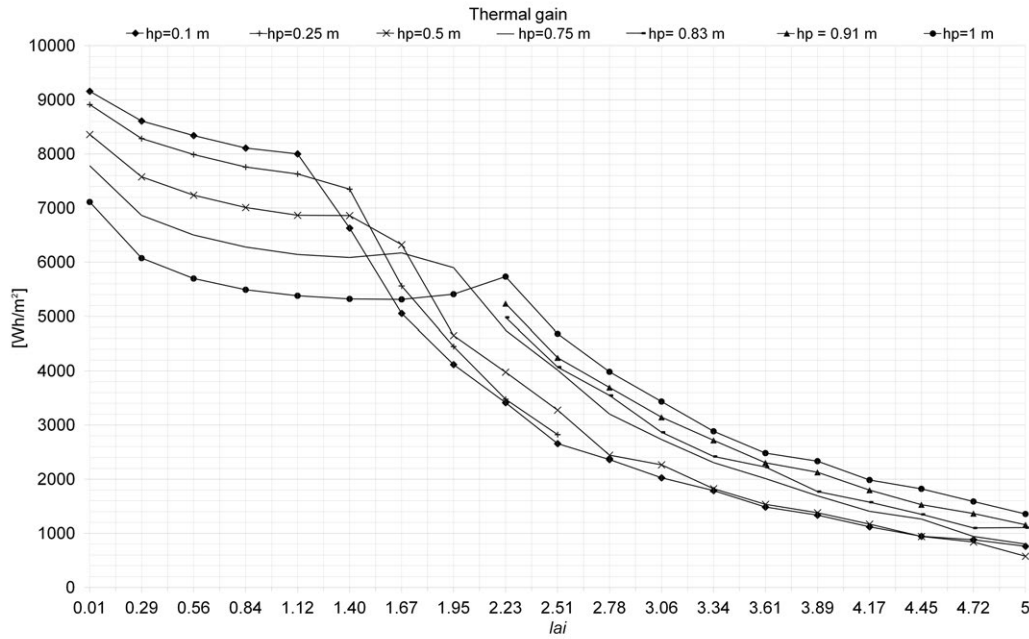


Figura 9.6: Ganancia térmica a través de la cubierta vegetal en función de “*lai*” (área de índice foliar) para diferentes valores de “*hp*” (altura de las plantas)

8).

La gráfica obtenida a partir de estos valores se muestra en la Figura 9.7 y la ecuación que la define está representada mediante una línea recta. Por tanto, obtenemos:

$$E_3 = 2994hp - 406,1 \quad (9.5)$$

El valor obtenido debe ser restado al valor de $E_{1,1}$.

Región $1,12 < lai \leq 2,23 \forall hp$.

En esta parte del gráfico, podemos observar cómo el flujo permanece prácticamente constante para el valor $lai = 1.12$, hasta que se produce el

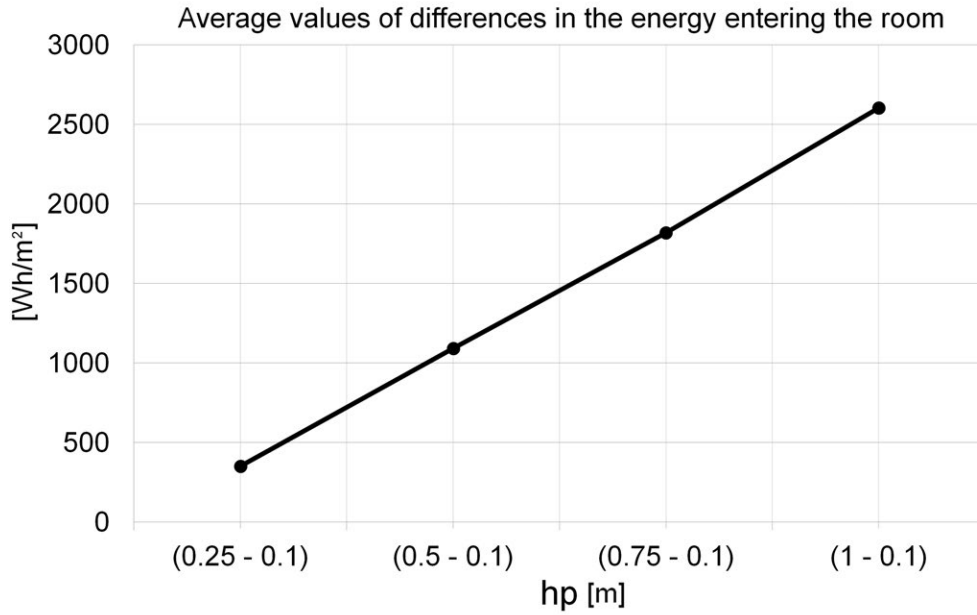


Figura 9.7: Valores promedio de las diferencias entre el valor de la ganancia térmica a través de la cubierta verde para $hp = 0.1$ m y valores para $hp \neq 0.1$ m con $0.29 \leq lai \leq 1.12$.

cambio de tendencia. El punto en el que la gráfica cambia de tendencia no es el mismo para todo los valores hp ya que, cuando hp crece, los valores de lai también crecen en este punto. Por este motivo, resulta apropiado calcular los puntos en que la tendencia cambia:

- a la izquierda del punto, el flujo es el mismo que para $lai = 1.12$, y puede calcularse como sigue:

$$E_{6,1} = E_1(1,12) - E_3 \quad (9.6)$$

- a la derecha del punto, el flujo adquiere el valor predefinido que le

corresponde incrementado por una cantidad que depende de hp , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E_{6,2} = E_1 + 3072hp^2 - 1269hp + 575,3 \quad (9.7)$$

La ecuación que define la parte de la función/gráfica donde la tendencia cambia se obtiene a través de una serie de simulaciones, como se muestra a continuación:

$$Y = 0,5808hp^2 + 0,4393hp + 1,209 \quad (9.8)$$

Región $2,23 < lai \leq 3,06$ for $0,1 < hp \leq 0,25$ En esta región del gráfico, podemos decir que el valor de la ganancia térmica es equivalente al valor que adquiere para $hp = 0.1$ m y, por tanto, no es necesario aplicar correcciones.

Región $2,23 < lai \leq 2,78$ for $0,25 < hp \leq 0,5$

El incremento necesario se define mediante la siguiente expresión:

$$E7 = 1797hp - 256,6 \quad (9.9)$$

Región $2,78 < lai \leq 3,06$ for $0,25 < hp \leq 0,5$ En esta zona del gráfico, el valor de la ganancia térmica es equivalente al valor de $hp = 0.1$ m y, por tanto, no requiere corrección alguna.

Región $2,23 < lai \leq 3,06$ for $0,5 < hp \leq 1$

En este caso, se desarrolló una ecuación que definiera la gráfica correspondiente a $hp = 1$ m. El valor $E_{1,2}$ se resta a este valor, así como, otra cantidad que varía según hp .

La ecuación para esta parte del gráfico es:

$$E_{4,2} = 7,848 \cdot 10^4 e^{-1,787 lai} + 1,053 \times 10^4 e^{-0,4043 lai} - E_{1,2} + 2785 hp - 2950 \quad (9.10)$$

Región $3,06 < lai \leq 5$ for $0,75 < hp \leq 1$

En esta parte del gráfico, el valor de la ganancia térmica es equivalente al valor que adquiere para $hp = 0.1$ y, por tanto, no requiere corrección alguna.

Región $3,06 < lai \leq 5$ for $0,1 < hp \leq 0,75$

Al igual que en el caso anterior, se desarrolla una ecuación que defina la función correspondiente a $hp = 1$, a partir del cual el valor $E_{1,2}$ se resta posteriormente, así como, otra cantidad que varía según hp . La ecuación queda definida mediante la siguiente expresión:

$$E_{4,1} = 7,848x10^4 e^{-1,787 lai} + 1,053x10^4 e^{-0,4043 lai} - E_{1,2} + 1,147x10^4 hp^2 - 1652hp + 5132 \quad (9.11)$$

Esto queda resumido en la Tabla 9, que también muestra las correcciones aplicadas a la ecuación descrita al comienzo del párrafo, a fin de obtener en la energía correspondiente a los valores de lai y hp en cada caso.

Siguiendo el mismo procedimiento empleado en secciones anteriores, se calcula la corrección que hay que aplicar a la ecuación de la ganancia térmica en función del lai , según las variaciones en la conductividad térmica del sustrato. Independientemente del valor de lai , la función correspondiente a $\lambda = 0.7 \text{ W/(mK)}$ define la parte más alt del gráfico y, por tanto, los valores

correspondientes a la ganancia térmica para $\lambda = 0.7 \text{ W/(mK)}$ son algunos de los más elevados y, en la mayoría de los casos, coinciden con los valores de flujo para otros valores de λ . (Fig. 9.8)

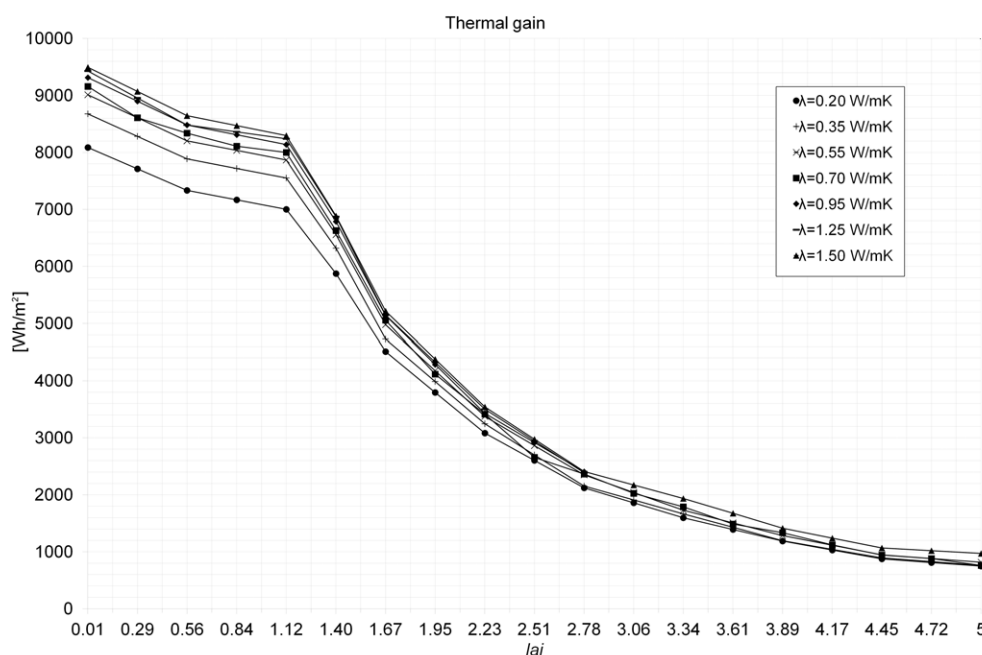


Figura 9.8: Ganancia térmica a través de la cubierta ecológica en función de “ lai ” (área de índice foliar) para diferentes valores de “ λ ” (conductividad térmica del sustrato)

Región $0,2 \leq \lambda \leq 0,7$. En esta zona del gráfico, se observan tres tendencias diferentes. Para obtener las correcciones adecuadas en cada caso, se sigue el procedimiento descrito en el párrafo anterior, calculando el promedio de las diferencias entre el valor de flujo obtenido para el valor por defecto del λ y los valores obtenidos en los otros casos.

Región $0,2 \leq \lambda \leq 0,7$ for $0 \leq lai \leq 1,12$

En esta sección, la energía $E_{2,1}$ es:

$$E_{2,1} = -(60120\lambda^2 - 7109\lambda + 2202) \quad (9.12)$$

Región $0,2 \leq \lambda \leq 0,7$ for $1,12 < lai \leq 4$

En este caso, la ecuación es como sigue:

$$E_{2,2} = 830,8\lambda^2 + 61,12\lambda - 337,1) \quad (9.13)$$

Región $0,2 \leq \lambda \leq 0,7$ for $4 < lai \leq 5$.

En esta parte del gráfico el valor de la ganancia térmica es prácticamente equivalente al valor para $\lambda = 0,7 \text{ W/(mK)}$ y, por tanto, no se requieren correcciones.

Región $0,7 < \lambda \leq 1,5$.

Para $0,7 < \lambda \leq 1,5$, independientemente del valor de lai , los resultados son muy similares a aquellos obtenidos con una conductividad por defecto. Para tener en cuenta las pequeñas diferencias, fue suficiente con añadir una constante que variara según lo hiciera lai .

Para $0 \leq lai \leq 1,4$, $E_{2,3} = 298$ y para $1,4 < lai \leq 5$, $E_{2,4} = 127$.

Estos valores son el resultado del promedio de las diferencias entre el valor correspondiente a la ganancia térmica para un valor máximo de conductividad $\lambda = 1,5 \text{ W/(mK)}$ y el valor de la ganancia térmica para $\lambda = 0,7 \text{ W/(mK)}$.

Una vez que se ha desarrollado el modelo simplificado, es posible obtener el valor de la ganancia térmica para las tres variables relevantes y se obtienen las siguientes expresiones: Si $1,12 < lai \leq 2,23$, el valor de la ganancia térmica será:

$$E = E_6 + E_2 \quad (9.14)$$

Si el l_{ai} tiene cualquier otro valor, la ganancia térmica se calculará del siguiente modo:

$$E = E_1 + E_2 - E_3 + E_4 + E_6 + E_7 \quad (9.15)$$

Estas expresiones reproducen el valor de energía por unidad de superficie que entra a través de la cubierta ecológica del edificio, si las capas de la cubierta son las mismas que las empleadas en el modelo de simulación. Las ecuaciones para los diferentes factores se resumen en la Tabla 10.

9.3.2. Modelo de la resistencia térmica del sustrato

Para obtener una fórmula que sea válida para todo tipo de cubierta ecológica extensiva altamente aislada y localizada en zonas climáticas del tipo mediterráneo costero, se desarrolló un modelo de simulación simplificado para la resistencia térmica de sustrato que es independiente en las capas de la cubierta. El desarrollo del modelo para determinar la resistencia equivalente de la vegetación no entraba dentro del ámbito del presente estudio, ya que era imposible incluir todas las variaciones que derivaran del porcentaje de la superficie de cubierta con vegetación. De hecho, la temperatura sol-aire también depende de las características del material de cubierta, como los coeficientes de emisividad y absorción. Estos coeficientes varían según el material empleado y cubren un gran rango de valores. Para las cubiertas que no están completamente cubiertas con vegetación, la definición de estos coeficientes debe realizarse teniendo en cuenta tanto el porcentaje de cobertura como las propiedades ópticas del sustrato. Para cubiertas que se

encuentren totalmente cubiertas con vegetación por favor consultar la Figura 9.4, mediante la cual es posible establecer los valores de resistencia térmica equivalente asociados a los valores de lai y hp .

El procedimiento empleado es el mismo que el seguido en el desarrollo del modelo mencionado, excepto que en este caso el valor desconocido es la diferencia entre el promedio de las temperaturas superficiales exteriores y el promedio de las temperaturas superficiales en la superficie interior, denotado como ΔT .

Los resultados del modelo se muestran a continuación:

Si $1,12 < lai \leq 2,23$

$$\Delta T = T_3 \quad (9.16)$$

Si lai tiene cualquier otro valor:

$$\Delta T = T_1 - T_2 + T_4 + T_5 \quad (9.17)$$

donde:

$$T_{1,1} = 0,5976lai^2 - 1,908lai + 8,849 \quad (9.18)$$

Para $0 \leq lai \leq 1,12$

$$T_{1,2} = 21,71e^{-1,8lai} + 9,06e^{-0,522lai} \quad (9.19)$$

Para $1,12 < lai \leq 5$

$$T_2 = 2,924hp - 0,385 \quad (9.20)$$

Para $0 \leq lai \leq 1,12$, $\forall hp$

$$T_3 = T_{1,2}(1,12) - T_2 \quad (9.21)$$

A la izquierda del punto donde el gráfico cambia

$$T_3 = T_{1,2} - 0,03539hp^{-2,19} + 1,251 \quad (9.22)$$

A la derecha del punto donde el gráfico cambia

$$T_{4,1} = 235,9e^{-2,556lai} + 13,39e^{-0,4658lai} - T_{1,2} + 17,81hp^3 - 36,57hp^2 + 25,88hp + 6,929 \quad (9.23)$$

Para $3,06 < lai \leq 5$ and $0,5 \leq hp \leq 1$

$$T_{4,2} = 235,9e^{-2,556lai} + 13,39e^{-0,4658lai} - T_{1,2} + 2,68hp + 2,848 \quad (9.24)$$

Para $2,23 \leq lai \leq 3,06$ and $0,5 < hp \leq 1$

$$T_5 = 3,378hp^2 - 1,293hp + 0,1869 \quad (9.25)$$

For $2,23 \leq lai \leq 2,78$ and $0,25 < hp \leq 0,5$ La descripción anterior se resume en la Tabla 9 y las ecuaciones para todos los diferentes factores se muestran en la Tabla 11.

9.4. Validación experimental del modelo para cubiertas

La validación experimental del modelo se ha realizado a través de la comparación de los datos de la simulación con los datos tomados en un edificio experimental a escala real situado en Agugliano, una localidad que se encuentra a 15 Km al sur-oeste de Ancona (Italia). Los tres periodos monitorizados corresponden a los meses de junio, julio, agosto y septiembre de 2010, 2011 y 2012. De todos los períodos de monitorización, la validación se ha realizado considerando los datos tomados durante una semana de 2010, como se detallará en los próximos apartados.

9.4.1. Descripción del edificio experimental

El edificio experimental se construye a escala real de septiembre de 2007 a enero de 2008. Se trata de un edificio de una altura, planta rectangular (8.20 x 10.50 m) y una superficie total en planta de 86.10 m², equivalente a 250 m³. El ratio S/V es 0.89. La cubierta es a dos aguas, estando orientado uno de los faldones a Sur con una pendiente del 17 % y una longitud de 6.20 m; y el otro faldón a Norte, con una pendiente del 30 % y 2.25 m de largo. La cumbrera orientada Este - Oeste conecta ambos faldones.

Estas partes se diferencian por el acabo exterior (cerámica o de metal) y por el tipo de forjado (cerámico o madera) que puede tener o no una cámara de ventilación. Los seis tipos de cubiertas están aislados con una doble capa de poliestireno expandido de 0.12 m de espesor, con una conductividad térmica

de $0.035 \text{ W}/(\text{mK})$. Todos los tipos cumplen con el valor U estándar para la zona D ($U = 0.32 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$), según la actual normativa nacional sobre eficiencia energética.

Los seis tipos de cubiertas empleados se enumeran a continuación de acuerdo con su disposición, de Este a Oeste:

- 1 MNV–A–LR cubierta no–ventilada con forjado en madera y acabado exterior en cobre;
- 1 MNV–A–GR cubierta ecológica no–ventilada con forjado en madera;
- 2 MV6–A cubierta ventilada (cámara de ventilación de 0.06 m) con forjado en madera y acabado exterior metálico;
- 3 LV3–A cubierta ventilada (cámara de ventilación de 0.03 m) con forjado en madera y acabado cerámico;
- 4 LV6–A cubierta ventilada (cámara de ventilación de 0.06 m) con forjado en madera y acabado cerámico;
- 5 LV6–L cubierta ventilada (cámara de ventilación de 0.06 m) con forjado en hormigón y acabado cerámico;
- 6 MV6–L cubierta ventilada (cámara de ventilación de 0.06 m) con forjado en hormigón y acabado metálico;

La estructura portante está realizada en acero, con pilares HEA 120 y vigas IPE 180 atornilladas. Las paredes exteriores tienen un valor U de

0.20 W/(m²K) y están formadas por paneles aislantes multicapa de 10 cm, una cámara de ventilación de 30 cm y, en el lado interior, paneles OSB de 2.2 cm de espesor.

A fin de reducir al máximo los puentes térmicos, se trató de eliminar, en la medida de lo posible, las irregularidades de la albañilería. El forjado del suelo se realizó con 5 cm de hormigón ligeramente armado. A fin de reducir el valor U de este elemento, se insertaron dos paneles de poliestireno expandido de 5 cm de espesor cada uno y una conductividad térmica de 0.035 W/(mK).

9.4.2. Descripción de la cubierta ecológica y de los equipo de de toma de datos

La cubierta ecológica, de dimensiones 1.58 m x 2.00 m, se instaló encima de la cubierta MNV–A. Se trata de una cubierta extensiva caracterizada por vegetación perenne (Fig.9.9 y se construyó sin hacer ningún cambio en la estructura de la cubierta. La Tabla 2 describe las características principales de la cubierta.

La adquisición de datos de llevó a cabo empleando un data logger (Elog LSI Lastem). Este instrumento cuenta con una serie de canales de entrada que adquieren los datos registrados por varios sensores, como son los fluxímetros, las termoresistencias, los termohigrómetros y los anemómetros. El data logger recibe la información como señal eléctrica y la transforma en la magnitud deseada. La tasa de adquisición (el intervalo de tiempo entre dos medidas) puede variar entre 1 segundo y 12 horas. Por el contrario, la tasa de elaboración (el intervalo de tiempo entre dos medidas) puede variar entre 1 minuto y



Figura 9.9: Cubierta ecológica instalada en un edificio experimental a escala real.

24 horas. El valor registrado es el promedio de los valores adquiridos durante el intervalo de tiempo.

Las temperaturas superficiales de las distintas capas de la cubierta y las temperaturas de las superficies internas del edificio se midieron por medio de termoresistencias (PT100 Lsi-Lastem). Se emplearon un total de 28 termoresistencias. La temperatura y la humedad relativa del aire se midieron a través de termohigrómetros (DMA 572.1 Lsi-Lastem) que registraban las condiciones del aire interior, del aire exterior y del aire en el interior de las cámaras de ventilación.

La medida del flujo térmico de los distintos tipos de cubierta se llevó a cabo utilizando unos fluxímetros (Hukseflux HFP01). Los resultados que se pueden obtener a partir de ellos son generalmente buenos y, según datos en literatura, se habla de un error del $\pm 5\%$ aproximadamente. Se emplearon para la monitorización 10 fluxímetros.

Para medir las condiciones climáticas exteriores y así poder emplearlas en la interpretación de los datos de monitorización, se instaló en el edificio una estación meteorológica dotada de un termohigrómetro para registrar la humedad y la temperatura exterior, de un radiómetro para registrar la radiación solar global, y de un anemómetro que recoge información sobre la dirección y la velocidad del viento. También se instaló un pluviómetro para medir la cantidad de agua de lluvia.

Se colocaron un total de seis termoresistencias PT100 en las distintas capas de la cubierta ecológica. De la capa más exterior a la capa más interior de la cubierta, se colocaron según las posiciones siguientes:

- dentro del sustrato, a dos alturas diferentes, una para registrar la temperatura en la parte más profunda del sustrato y otra, por debajo de la superficie de la tierra para registrar la temperatura superficial del sistema de la cubierta ecológica;
- en las superficies interior y exterior de la lámina de cobre;
- en la superficie exterior del aislamiento;
- en la superficie interior del acabado en madera, para registrar la temperatura superficial interior.

La precision de los sensors es ± 0.15 K para las termoresistencias; ± 0.2 K y $\pm 2\%$ para los termohigrómetros.

9.4.3. Validación del modelo simplificado para cubiertas

Entre 2010 y 2012, la cubierta ecológica cambió considerablemente, alternando periodos secos con otros con densa vegetación. De hecho, en dos ocasiones la vegetación se secó y tuvo que ser reemplazada. La monitorización de la temperatura y el flujo se realizó incluso cuando la cubierta se secó, a fin de poder comparar el comportamiento de la cubierta con y sin vegetación. El estudio se centró en los veranos de 2010, 2011 y 2012. Durante estos periodos hubo momentos en los que existía vegetación en la cubierta y otros en los que la cubierta se secó completamente.

Durante los siguiente periodos, hubo vegetación:

- del 1.06.2010 al 14.07.2010: vegetación sin crecimiento completo;
- del 15.07.2010 al 30.09.2010: vegetación densa;
- del 19.07.2011 al 11.08.2011: vegetación sin crecimiento completo;
- del 12.08.2011 al 30.09.2011: vegetación densa.

No hubo vegetación durante los siguientes periodos:

- del 1.06.2011 al 18.07.2011;
- del 14.06.2012 al 30.09.2012.

De cara a la validación del modelo, se han considerado el flujo térmico y las temperaturas registradas desde el 4 hasta el 10 de julio de 2010. Durante ese período fue posible analizar en detalle el crecimiento de la vegetación y las condiciones del sustrato, tomando los datos necesarios para su introducción en el modelo.

Aplicando las ecuaciones mencionadas al caso específico de la cubierta de Agugliano, caracterizada por $l_{ai} = 2$, $h_p = 0.22$ m y $\lambda = 0.33$ W/(mK), empleando la fórmula $R = \frac{\Delta T}{Q}$ y restando el valor 2.59 m²K/W al resultado obtenido, correspondiente a las resistencias térmicas conocidas de la cubierta, se obtiene un valor de resistencia térmica del sustrato de 0.22 m²K/W. El valor de la resistencia térmica de la vegetación que pude deducirse de la Figura 9.4 es alrededor de 7 m²K/W. La resistencia térmica equivalente de la vegetación es un valor promedio condicionado por todos los eventos que tuvieran lugar en esta capa durante el periodo de medición. El objetivo del cálculo del valor promedio es representar todos los fenómenos significativos, excluyendo los se dan con una frecuencia elevada, que no pueden considerarse de forma singular en el modelo mencionado anteriormente.

Si se comparan los datos de monitorización analizados, se puede observar cómo durante el periodo comprendido entre el 4 y el 10 de julio del 2010 el promedio del flujo entrante a través de la cubierta es 0.47 W/m². Durante el mismo periodo, el promedio de la temperatura sol-aire es 31.41 °C, el promedio de la temperatura del sustrato es 28.34 °C y el promedio de la temperatura superficial por debajo del sustrato es 28.24 °C. Aplicando la fórmula $R = \frac{\Delta T}{Q}$, se obtiene un valor de resistencia térmica de 0.21 m²K/W y una resistencia equivalente de 6.53 m²K/W para la vegetación. Comparando

los resultados experimentales con los derivados del modelo numérico, se puede afirmar que el modelo sobrestima el valor de la resistencia térmica de la cubierta vegetal con un error de aproximadamente el 4.8 % para el sustrato y el 7.2 % para la vegetación (Tabla 12).

9.5. Aplicación de la metodología a otros lugares

Vista la fiabilidad del modelo, se utiliza la misma metodología para ajustar modelos simplificados a otros lugares. El objetivo es crear un modelo que sea válido para toda el área mediterránea. Se eligen por lo tanto tres ciudades caracterizadas por condiciones climáticas diferentes que, junto con Ancona, puedan cubrir las principales características climáticas del área objeto de estudio. Las ciudades seleccionadas resultan ser las siguientes:

- Bolzano
- Ancona
- Madrid
- Cádiz

La ciudad de Bolzano (46°29'N 11°20'E), situada en un valle de montaña, tiene un clima continental con temperaturas mínimas que en invierno por lo general están por debajo 0 °C y máximas de verano que superan los 35 °C. Las precipitaciones no son muy abundantes, cayendo en media poco más de 700 mm, se dan sobre todo como temporales de verano y nieve en invierno.

Las áreas del municipio situadas a mayor altitud se caracterizan por un clima alpino, cuyas características varían según la altitud, la orografía y la exposición. Los veranos son muy calurosos y los inviernos muy rigurosos, también debido a la posición en una cuenca que impide el intercambio de aire.

El clima de Ancona (43°35'N 13°30'E) se caracteriza por la unión de los elementos típicamente continentales con otros claramente mediterráneos. Si desde el punto de vista térmico son obvias las influencias mediterráneas, que suavizan los rigores del invierno y el calor del verano, desde el punto de vista de las lluvias, la ciudad no experimenta el verano "seco" típico de otros lugares con un clima mediterráneo. Los inviernos son moderadamente fríos y húmedos (promedio enero 5 °C), con lluvias y niebla muy frecuentes, mientras que las estaciones intermedias tienen características muy variables. El verano es caluroso y bastante húmedo (promedio agosto 22.5 °C, debido a la proximidad del mar. Los temporales son frecuentes en agosto y a principios de septiembre, cuando pueden tomar características de tormentas. Los picos de calor significativos se dan en relación a los vientos provenientes del Norte de África.

Madrid (40°24'N 3°41'E) está caracterizada por un clima mediterráneo continental que se ve muy afectado por las condiciones urbanas. Los inviernos son fríos, con temperaturas inferiores a los 4 - 5 °C, heladas frecuentes y nevadas. Los veranos son calurosos con medias en torno a los 24 °C con máximas que, puntualmente, pueden alcanzar los 40 °C. La oscilación diaria es importante en la periferia urbana, pero se ve reducida en el centro de la ciudad por el efecto de la isla de calor urbana. Consecuencia de la gran distancia del mar y de la altitud, la amplitud térmica anual es alta. Las pre-

precipitaciones anuales son superiores a los 400 mm, con mínimos muy marcados en verano.

El clima de la ciudad de Cádiz ($36^{\circ}30'N$ $6^{\circ}20'E$) es un clima mediterráneo oceánico, con una temperatura media anual de aproximadamente $18^{\circ}C$. El mes más cálido es el de agosto, con una media de $27.7^{\circ}C$, con veranos realmente calurosos. El mes más frío es el de enero, con una temperatura media de $7.7^{\circ}C$, los inviernos no son demasiado fríos y en los días soleados llegan a registrarse temperaturas agradables. En cuanto a los días de sol, tiene alrededor de 3.000 horas anuales de sol, siendo una de las ciudades más soleadas de España. Pero también participa de las características del clima Atlántico sur, debido a su volumen de precipitaciones anuales, que está en los 604 mm y por la total ausencia de nevadas.

La metodología empleada para cada una de las ciudades es la misma que se utilizó para la ciudad de Ancona: como primer paso se realiza una simulación con todas las variables por defecto para determinar la ganancia térmica correspondiente a la cubierta ecológica con todas las variables por defecto. En segundo lugar se hacen dos simulaciones para cada variable, dando a la variable el valor máximo y mínimo que el programa permite y dejando las variables restantes con sus valores por defecto y obteniendo así un valor de energía para cada simulación. Los resultados se comparan con el valor obtenido a partir de los valores por defecto de todas las variables y se consideran como relevantes sólo las variaciones superiores al 10 % (Figura 9.1).

Los resultados del estudio demostraron que las variables que suponen variaciones energéticas superiores al 10 % cambian al variar de la ciudad y en ningún caso coinciden exactamente con las variables significativas para la

ciudad de Ancona (índice de área foliar, altura de las plantas y conductividad del sustrato seco).

Para Bolzano son las siguientes:

- índice de area foliar (lai);
- altura de las plantas (hp);
- mínimo contenido de humedad en el sustrato;
- máximo contenido de humedad en el sustrato.

En el caso de Madrid, las variables relevantes son las mismas que las de Bolzano y además:

- reflectividad de las hojas;
- conductividad del sustrato seco (λ);

Para la ciudad de Cádiz, las variables coinciden con las de la ciudad de Madrid, menos por el hecho que la conductividad del sustrato no resulta relevante.

Realizando las simulaciones para otras estaciones del año además se observa que, para la misma ciudad, las variables significativas varían dependiendo de la estación.

De estos resultados se puede concluir que el modelo desarrollado para la cubierta ecológica de Ancona no es válido directamente para ser adaptado a fachadas dado que habría que desarrollar un modelo para cada lugar y para cada estación del año.

9.6. Ajuste de un modelo de regresión lineal para fachadas

Debido a los resultados obtenidos en el estudio del modelo simplificado para la cubierta ecológica de Ancona, se comienza a ajustar un nuevo modelo desde cero, partiendo de los siguientes supuestos:

- las variables climáticas tienen que entrar en el modelo para que pueda aplicarse a más de un clima;
- la vegetación se estudiará como un conjunto único, sin entrar en detalle en las características de hojas y sustrato;
- el modelo tiene que ser válido para todas las estaciones del año.

Dado que a través de la adaptación y la simplificación de un modelo de simulación existente no ha sido posible desarrollar un modelo válido para las fachadas, el nuevo modelo tendrá un carácter empírico y se basará en datos de monitorización.

Para reducir al mínimo el número de variables, se utilizan los datos tomados en la primera fase de monitorización, donde se ha estudiado el comportamiento del cerramiento sin aislante (Capítulo 7).

Dado que lo que interesa es desarrollar un modelo que pueda prever el comportamiento del módulo con vegetación frente al módulo sin ella, en lugar de trabajar sobre un modelo que describa exclusivamente el comportamiento del cerramiento vegetal, se trabaja sobre un modelo que reproduzca la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con

vegetación. Por lo tanto, se toma como variable dependiente (o explicada) la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación y, a través del programa **R**, se estudia su comportamiento en función de las condiciones climáticas externas (variables independientes, explicativas o exógenas).

Las condiciones climáticas externas elegidas para el estudio han sido la temperatura, la humedad y la irradiancia vertical sobre una superficie orientada a sur. Estas tres variables, son las variables explicativas del modelo y la forma natural de estudiar estas dependencias es a través de los modelos de regresión lineal, es decir, expresando la diferencia de temperatura de los módulos como una combinación lineal de las variables exógenas. El hecho de que ninguna de las cuatro variables tenga observaciones independientes, puesto que éstas son observadas a través del tiempo, hace necesario ajustar los parámetros por un modelo autorregresivo con variables exógenas, que no es más que un modelo de regresión lineal múltiple en el que se introducen como variables explicativas los retardos de la variable explicada y de las variables explicativas. Para un estudio mas detallado de este tipo de modelos, véase Shumway and Stoffer (2011). Esto es, ajustamos un modelo de la forma

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 y_{t-1} + \beta_2 y_{t-2} + \beta_3 \theta_t + \beta_4 \theta_{t-1} + \beta_5 H_t + \beta_6 H_{t-1} + \beta_7 I_t + \beta_8 I_{t-1} + \varepsilon_t. \quad (9.26)$$

donde el subíndice t hace referencia al tiempo t medido en horas, desde $t = 1, \dots, T$, $T = 25008$ que son las horas observadas desde las 00:00 horas del 1 de enero de 2009 hasta las 23:00 horas del 8 de noviembre de 2011. La

variable y_t es la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación en la hora t , θ_t es la temperatura exterior, H_t es la humedad relativa del aire en el exterior e I_t es la irradiancia global sobre superficie vertical orientada a sur. Los parámetros β_i , $i = 0, \dots, 9$ del modelo se estiman de forma que se minimiza la suma de los residuos al cuadrado como en el modelo de regresión lineal. Los residuos del modelo ε_t son ruido blanco, es decir, $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma)$, con σ constante. La bondad de ajuste del modelo se mide con el coeficiente de determinación R^2 .

Debido a la heterogeneidad de los datos y a la gran cantidad de los datos faltantes, y para poder facilitar la interpretabilidad del modelo, se agrupan las franjas horarias de comportamiento térmico similar. De esta forma se han promediado, para cada variable, los valores de la post media noche (01:00 - 06:00), valores de la mañana (07:00 - 10:00), valores de mediodía (from 11:00 - 14:00), valores de la tarde (from 15:00 - 18:00) y valores de pre media noche (19:00 - 00:00). Para cada una de las 5 franjas horarias y para cada uno de los cuatro sensores, se ha estimado los modelos, obteniendo los siguientes resultados (cuadro 9.1).

La última de las columnas muestra el coeficiente de determinación de los modelos estimados. Éste mide qué porcentaje de variabilidad de la variable "diferencia de temperatura entre los módulos sin panel vegetal y con panel vegetal" queda explicada con el modelo utilizado. Podemos ver que éstos coeficientes son muy altos, rondan los valores del 85 % de la variabilidad explicada para los periodos diurnos y el 90 % de la variabilidad explicada en los periodos nocturnos. Además, para cada unos de los periodos, es el sensor de la chapa exterior el que presenta peor ajuste de los cuatro modelos, excepto

Cuadro 9.1: Parametros estimados y coeficientes de determinación para cada uno de los cuatro sensores y los cinco periodos horarios analizados.

Time	Pos.	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	R^2
M	F	0.73	0.58	0.10	0.13	-0.09	0	-0.01	0	0	0.85
M	C	1.06	0.54	0.14	0.10	-0.07	-0.006	-0.007	0	0	0.84
M	I	0.46	0.45	0.16	0.19	-0.11	0	-0.013	0	0	0.79
M	E	0.98	0.62	0.11	0.22	-0.21	-0.021	0.0082	0.016	-0.013	0.63
MD	F	0.79	0.58	0.10	0.05	-0.028	-0.008	-0.004	0.0007	-0.0004	0.84
MD	C	1.89	0.65	0.09	0.11	-0.099	-0.025	0	0.005	-0.003	0.82
MD	I	1.89	0.65	0.093	0.11	-0.099	-0.025	0	0.005	-0.003	0.82
MD	E	4.16	0.78	0.032	0.15	-0.21	-0.095	0.050	0.024	-0.020	0.84
E	F	1.53	0.74	0	0.042	-0.031	-0.033	-0.016	0	0	0.86
E	C	2.33	0.69	0.067	0.096	-0.098	-0.054	0.029	0	0	0.84
E	I	3.53	0.63	0.13	0.12	-0.12	-0.091	0.052	0	0	0.85
E	E	3.93	0.65	0.12	0.15	-0.17	-0.136	0.088	0.017	-0.013	0.82
BMN	F	1.22	0.81	0	0.055	-0.047	-0.030	-0.017	0	-0	0.92
BMN	C	1.35	0.81	0	0.035	-0.031	-0.036	-0.022	0	0	0.90
BMN	I	0.96	0.70	0.12	0.16	-0.13	-0.021	0.008	0	0	0.94
BMN	E	-0.64	0.66	0.16	0.33	-0.28	-0.02	-0.02	0	0	0.87
AMN	F	0.97	0.64	0.11	0.13	-0.10	-0.006	-0.006	0	0	0.91
AMN	C	1.09	0.64	0.10	0.09	-0.07	-0.01	0	0	0	0.90
AMN	I	0.51	0.61	0.12	0.22	-0.17	0.006	-0.018	0	0	0.90
AMN	E	-1.04	0.60	0.09	0.36	-0.31	0.02	-0.02	0	0	0.70

para el periodo de mediodía, que presenta una bondad de ajuste muy similar a la de los otros tres sensores.

La penúltima de las columnas muestra la estimación de la varianza residual. El error que se comete al predecir la variable explicada, Y_t depende de forma directa de esta variabilidad. Observamos, al igual que ocurría con el coeficiente de determinación que los valores peores, en este caso los más altos, corresponden al sensor del panel exterior. A parte de estos sensores, las estimaciones de las variabilidades residuales son en casi todos los casos menores que 1, observando un leve mejor comportamiento en los modelos de los periodos nocturnos que en los diurnos.

Los coeficientes relativos a la irradiancia (β_7, β_8) sólo son significativos en los cuatros sensores en el periodo del día relativo al mediodía, y en el sensor exterior en la mañana y la tarde. En todos los casos los coeficientes toman valores muy pequeños y el retardo en $t - 2$ compensa el valor del retardo en $t - 1$. Es decir, los coeficientes $\hat{\beta}_7$ son pequeños y positivos y los coeficientes $\hat{\beta}_8$ son negativos y de magnitud un poco menor, de forma que el efecto de $\hat{\alpha}_3$ es muy pequeño.

La dependencia de la variable humedad es más heterogénea, los coeficientes que la explican (β_5, β_6) son en general negativos y pequeños en valor absoluto. Esto se interpreta como que la humedad corrige la influencia de la variable más relevante, la temperatura exterior, y a mayor humedad menor es la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación.

Los coeficientes relativos a cómo afecta la temperatura exterior θ_t a la diferencia de temperatura entre módulos y_t , (β_3, β_4) son de mayor valor, el

coeficiente relativo a la temperatura del día β_3 es positivo y alto (a mayor temperatura, mayor diferencia de temperatura entre los módulos) mientras que el coeficiente relativo a la temperatura del día anterior es menor en valor absoluto y negativo, lo que implica que el efecto sobre el parámetro $\hat{\alpha}_1$ está suavizado.

Finalmente los coeficientes $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$ son los relativos a la parte autorregresiva del modelo, es decir, son los parámetros de la regresión lineal de y_t sobre sus propios retardos, explica cómo depende el valor de la diferencia de temperatura en tiempo t , y_t , en función de los valores de la diferencia de temperatura en tiempos $t - 1$ y $t - 2$. Todos los coeficientes estimados son relativamente grandes y positivos (salvo los dos β_0 del sensor del panel exterior en los periodos nocturnos).

9.6.1. Modelo predictivo

Los parámetros β_i , $i = 0, \dots, 9$ de los modelos permiten predecir observaciones futuras y_{t+1} , dadas las observaciones hasta tiempo t . En esta tesis además se utilizan los parámetros estimados para estudiar el comportamiento medio de la diferencia de temperatura de los módulos en función de los valores esperados de la temperatura exterior, $E(\theta_t)$, humedad relativa del aire en el exterior, $E(H_t)$ e irradiancia global sobre superficie vertical orientada a sur $E(I_t)$. Se utiliza la propiedad de que las series estudiadas son estacionarias, y por lo tanto la función media $E(x_t)$, de una serie estacionaria es independiente del tiempo t , se puede escribir $E(y_t) = \mu_y$, $E(\theta_t) = \mu_\theta$, $E(H_t) = \mu_H$, and $E(I_t) = \mu_I$. Tomando esperanzas en la ecuación (9.27)

$$\begin{aligned}
E(y_t) = & \beta_0 + \beta_1 E(y_{t-1}) + \beta_2 E(y_{t-2}) + \beta_3 E(\theta_t) + \beta_4 E(\theta_{t-1}) + \beta_5 E(H_t) + \\
& \beta_6 E(H_{t-1}) + \beta_7 E(I_t) + \beta_8 E(I_{t-1})
\end{aligned}
\tag{9.27}$$

de forma que se puede estimar el valor esperado promedio de la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación, teniendo en cuenta la temperatura exterior promedio, la humedad promedio y la irradiancia promedio en ese periodo del día. Por lo tanto, el **modelo predictivo** resulta ser el siguiente:

$$\mu_y = \alpha_0 + \alpha_1 \mu_\theta + \alpha_2 \mu_H + \alpha_3 \mu_I$$

donde la estimación de los parámetros $\hat{\alpha}_0$, $\hat{\alpha}_1$, $\hat{\alpha}_2$ y $\hat{\alpha}_3$ se obtiene a partir de la estimación por mínimos cuadrados de los parámetros β_i ,

$$\begin{aligned}
\hat{\alpha}_0 &= \frac{\hat{\beta}_0}{1 - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2} & \hat{\alpha}_1 &= \frac{\hat{\beta}_3 + \hat{\beta}_4}{1 - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2} \\
\hat{\alpha}_2 &= \frac{\hat{\beta}_5 + \hat{\beta}_6}{1 - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2} & \hat{\alpha}_3 &= \frac{\hat{\beta}_7 + \hat{\beta}_8}{1 - \hat{\beta}_1 - \hat{\beta}_2}
\end{aligned}$$

El cuadro 9.2 muestra los coeficientes estimados para los valores esperados que se han obtenido a partir de las estimaciones del modelo autorregresivo ((9.27)). El cuadro muestra todos los valores obtenidos, pero para estudiar el comportamiento hemos obviado los parámetros estimados en el caso del sensor de la chapa exterior.

Los coeficientes α_0 son valores positivos, especialmente grandes en el caso

Cuadro 9.2: Coeficientes calculados para la estimación del valor esperado promedio.

Time	Position	α_0	α_1	α_2	α_3
Morning	Floor	2.34	0.13	-0.035	0
Morning	Celing	3.31	0.10	-0.041	0
Morning	Int.	1.17	0.19	-0.033	0
Morning	Ext.	3.63	0.014	-0.047	0.01
Midday	Floor	2.52	0.095	-0.038	0.0009
Midday	Celing	3.40	0.059	-0.043	0.0028
Midday	Int.	7.38	0.041	-0.098	0.005
Midday	Ext.	22.57	-0.289	-0.243	0.025
Evening	Floor	6.01	0.041	-0.068	0
Evening	Celing	9.54	-0.010	-0.100	0
Evening	Int.	14.65	-0.010	-0.162	0
Evening	Ext.	17.90	-0.056	-0.216	0.019
Before midnight	Floor	6.36	0.043	-0.070	0
Before midnight	Celing	0.837	-0.069	-0.023	0
Before midnight	Int.	5.63	0.124	-0.081	0
Before midnight	Ext.	-3.78	0.274	-0.003	0
After midnight	Floor	3.86	0.114	-0.050	0
After midnight	Celing	4.41	0.090	-0.049	0
After midnight	Int.	1.93	0.184	-0.044	0
After midnight	Ext.	-3.42	0.150	0.0004	0

de los periodos de mediodía y tarde para el sensor de la chapa exterior y sólo negativos en los casos del mismo sensor pero en los periodos nocturnos. En general, en los modelos lineales, α_0 mide la diferencia de temperatura cuando el resto de las variables toma valor cero, pero en nuestro caso no tiene sentido estudiar el comportamiento con temperatura 0°C , humedad del 0 % e irradiancia de $0 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$.

El parámetro α_1 mide el incremento en la diferencia de la temperatura cuando aumenta la temperatura exterior un grado, y el resto de las variables permanecen constantes. En la mayoría de los casos este coeficiente es positivo, tomando valores entre 0.041 y 0.19. Para este rango de valores, un incremento en la temperatura exterior de 1°C supone que el módulo sin panel vegetal toma valores entre 0.041°C y 0.19°C mayor que el módulo con panel vegetal. Los casos en que éste coeficiente no pertenece a este rango de valores corresponden en su mayoría al sensor del panel exterior y a correcciones del parámetro α_0 con un valor estimado muy alto.

Los coeficientes α_2 miden el incremento de la diferencia de temperatura cuando aumenta la humedad un 1 % y el resto de las variables permanecen constantes. Para tomar una unidad de medida más adecuada, $10 * \alpha_2$ mide ese mismo incremento cuando aumenta la humedad un 10 %. En todos los casos, salvo el último correspondiente al panel exterior, es un valor negativo y pequeño, lo que significa que el aumento de la humedad supone una disminución de la diferencia de la temperatura entre 0.23 y 1.62°C .

Finalmente, la irradiancia solo es relevante en las horas del mediodía (y para el panel exterior en la mañana y la tarde), sus valores son positivos y de muy pequeño valor absoluto.

9.6.2. Análisis de resultados

Observando los resultados de los modelos, se nota cómo en todos los casos, durante la noche y la mañana, una disminución de la humedad relativa del aire exterior provoca un incremento en la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación. Del mismo modo, un aumento de la temperatura exterior produce en casi todos los casos, un aumento en la diferencia de temperatura entre los módulos.

La única excepción está representada por el aire interior cerca del techo, cuyo comportamiento no es constante. De hecho, mientras el efecto de la variación de la humedad relativa exterior es igual que en los otros puntos del módulo, no ocurre lo mismo para el efecto de la variación de temperatura exterior. Entre las 19:00 y las 23:00 horas, un aumento en la temperatura exterior provoca una disminución en la diferencia de temperatura entre los dos módulos, al contrario de lo que ocurre en la mayoría de los casos. El efecto nulo de la irradiancia es debido a que hasta las 10:00 horas no hay prácticamente radiación solar directa en la superficie analizada.

Por contra, la variable irradiancia toma relevancia en la explicación de los modelos relativos a las horas centrales del día. Se nota cómo su influencia es más significativa en la diferencia de temperatura medida en la superficie exterior de los módulos y menos significativa en la diferencia de temperatura registrada en el aire interior. Además, se puede observar cómo en esta misma franja horaria, tanto un incremento en la temperatura exterior como un descenso en la humedad relativa exterior, inducen en casi todos los casos un aumento en la diferencia de temperatura entre los dos módulos.

La única excepción está representada por la temperatura superficial exterior, cuya diferencia entre los dos módulos disminuye al aumentar la temperatura del aire. Aun así, los altos valores de irradiancia registrados en la superficie vertical orientada a sur durante esta franja horaria, hacen que la influencia de la variable irradiancia sea mucho mayor respecto a la influencia de la variable temperatura. Como consecuencia, en el módulo con vegetación siempre se registra una temperatura superficial inferior a la que se registra en el módulo sin vegetación.

Analizando los modelos de la tarde, se puede apreciar cómo la influencia de la irradiancia solo se observa en la diferencia de temperatura superficial exterior y cómo la humedad relativa toma relevancia tanto en la diferencia de las temperaturas superficiales como en la diferencia de las temperaturas interiores. En todos los casos, los coeficientes de humedad relativa son muy altos, lo que significa que en esta franja horaria la influencia de esta variable es especialmente importante.

Si observamos los coeficientes de la temperatura exterior, notamos cómo en la mayoría de los casos son negativos, es decir, un aumento de la temperatura supondría una disminución en la diferencia de temperatura entre el módulo sin vegetación y el módulo con vegetación, lo cual parece ilógico según los resultados anteriores. Esto se puede explicar considerando, por un lado, que un aumento de temperatura exterior supone siempre una bajada de humedad relativa. Por otro lado, dado que en esta franja horaria los coeficientes de humedad relativa son mucho más altos que los coeficientes de temperatura, la importancia de la variación de humedad relativa resulta ser notablemente mayor en comparación con la variación de temperatura. Como

Cuadro 9.3: Error cuadrático medio de los modelos estimados.

	Morning	Midday	Evening	Before midnight	After midnight
Floor	0.60	0.61	0.69	0.53	0.49
Celing	0.58	1.16	0.97	0.60	0.48
Interior surface	0.97	1.16	1.50	0.68	0.64
Exterior surface	1.27	3.54	4.12	1.17	0.90

consecuencia, en esta franja horaria en el módulo con vegetación se registran en la mayoría de los casos temperaturas inferiores a las que se registran en el módulo sin vegetación.

9.7. Validación experimental del modelo para fachadas

Para la validación de los modelos ajustados, se ha estimado el error cuadrático medio de cada uno de los modelos analizados en el apartado 5. El cuadro 9.3 se muestran estos errores.

Observamos, al igual que ocurría con el coeficiente de determinación que los valores peores, en este caso los más altos, corresponden al sensor del panel exterior. También se observa que los modelos se comportan mejor, se comete menos error, en los sensores de suelo y techo que en los que están situados en la chapa.

Con respecto a las horas del día, podemos observar, en general, el mejor comportamiento de la predicción para los modelos nocturnos (BMN y AMN) y el peor comportamiento de las predicciones en los periodos de medio día y tarde.

A continuación se muestran los gráficos de las figuras 9.10, 9.11, 9.12, 9.13, 9.14 de la temperatura en los cuatro sensores de los últimos 100 días del estudio y se superpone la predicción realizada por el modelo.

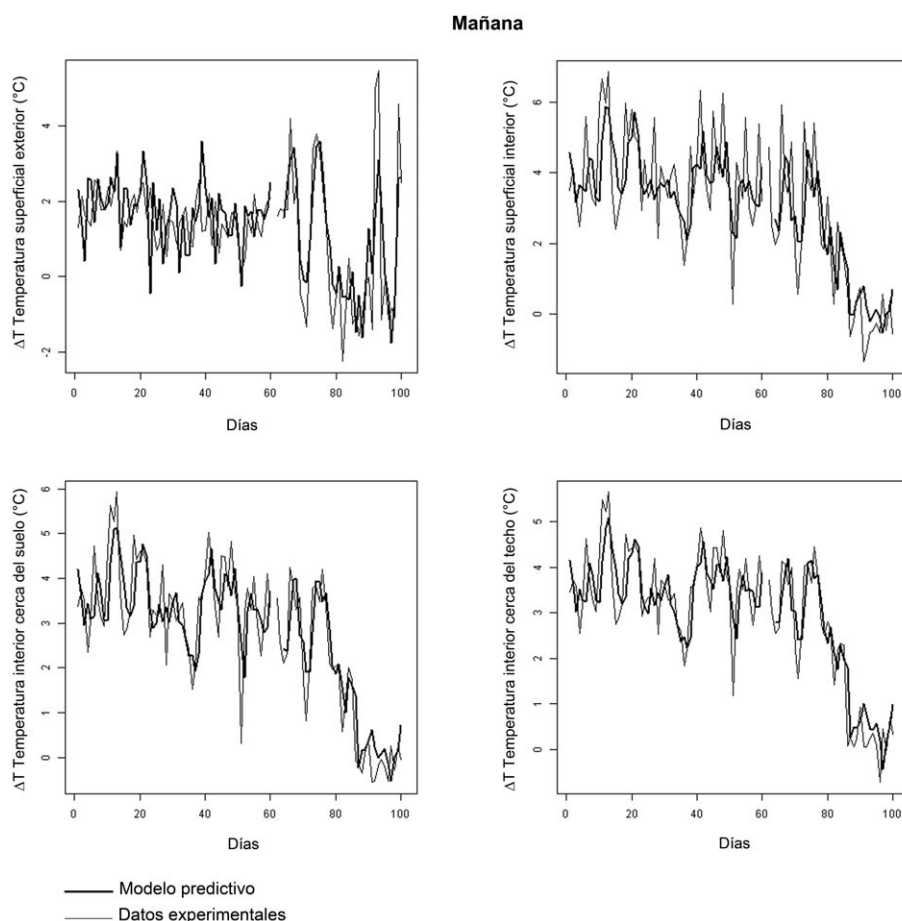


Figura 9.10: Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la mañana.

Para los cuatro sensores se puede observar el buen comportamiento de la predicción y el buen ajuste al descenso brusco de temperatura ocurrido en los últimos veinte días o incluso al aumento de la variabilidad ocurrida en

el sensor de chapa exterior en mediodía y tarde. El error cuadrático medio observado en estos dos casos son 3.54 y 4.12, los más altos del estudio.

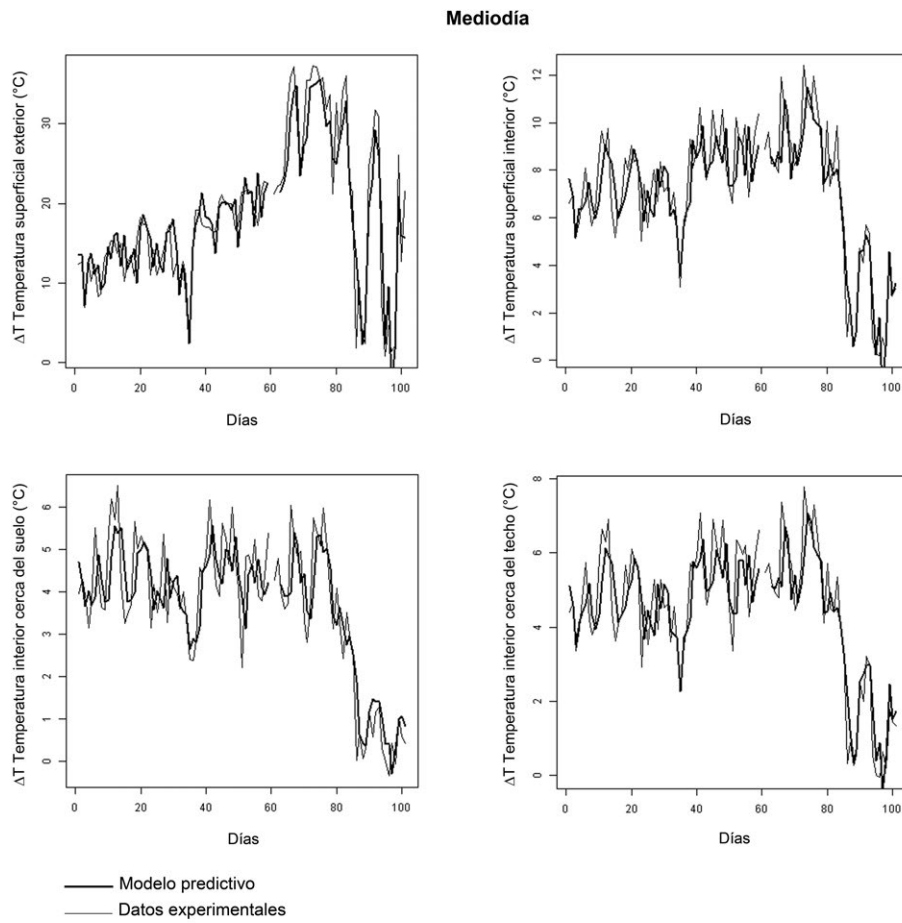


Figura 9.11: Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos del mediodía.

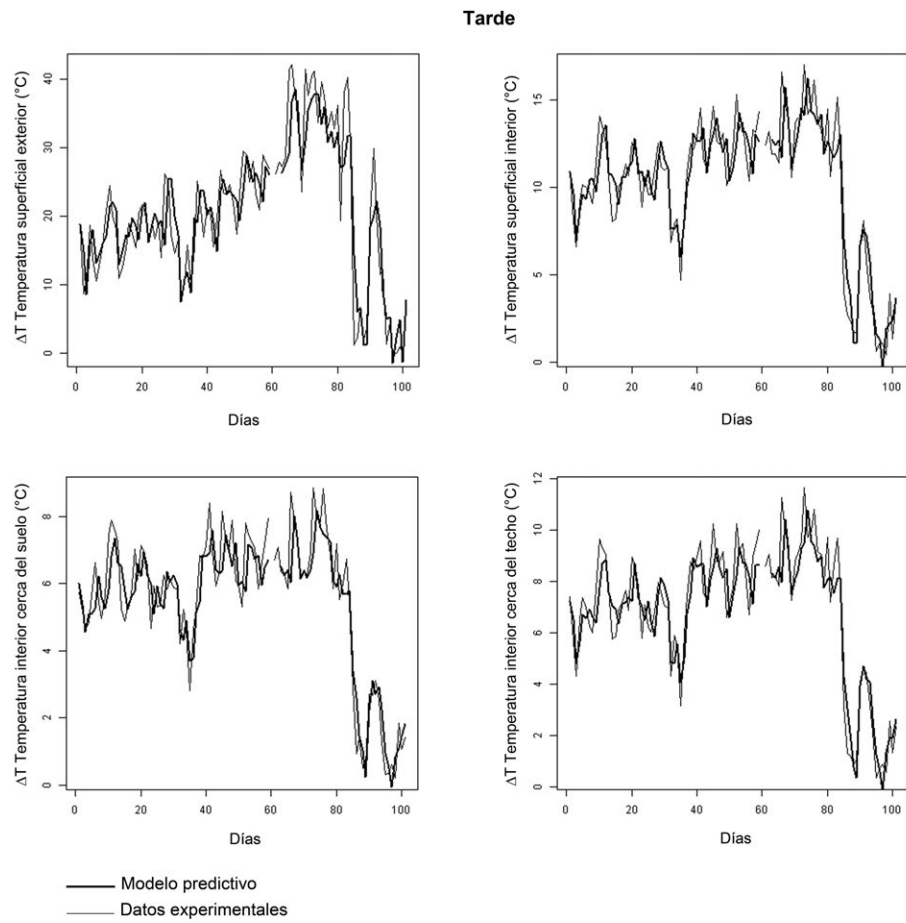


Figura 9.12: Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la tarde.

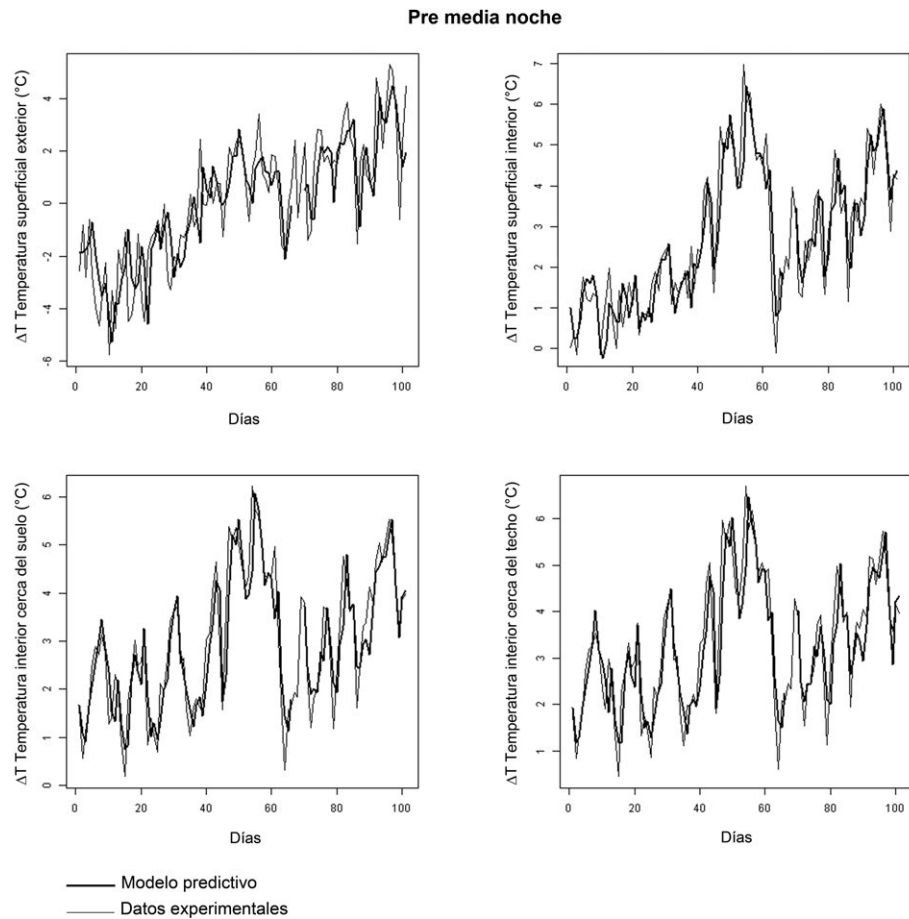


Figura 9.13: Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la pre media noche.

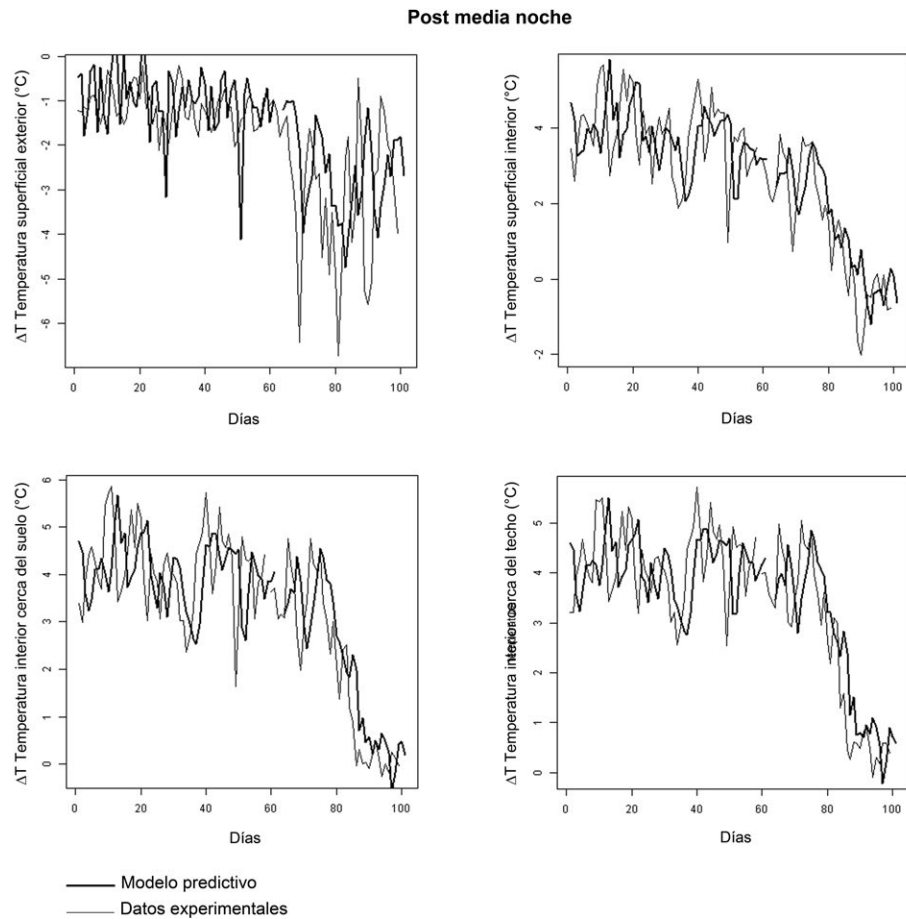


Figura 9.14: Datos observados y ajuste realizado de los últimos 100 días para los modelos de la post media noche.

Capítulo 10

Conclusiones

En este capítulo se recogen las principales conclusiones obtenidas en esta tesis doctoral, destacando especialmente las relativas a las fases del estudio experimental y al modelo predictivo del comportamiento térmico de una fachada vegetal. Las conclusiones se presentan obedeciendo al mismo orden adoptado en los capítulos anteriores, no expresando, por lo tanto, orden de importancia relativa.

Tras un primer párrafo de conclusiones generales, donde se demuestra el cumplimiento de las hipótesis de partida, se pasa a detallar las conclusiones referentes a las dos fases de monitorización y al modelo predictivo. Por último, se plantean las líneas de trabajo que esta investigación deja abiertas y los posibles desarrollos futuros de las mismas. De igual forma, se destaca la contribución que este trabajo ha supuesto en el ámbito de la investigación a lo largo de los años en los que se ha desarrollado.

10.1. Conclusiones generales

Esta tesis ha demostrado que el uso de elementos vegetales en fachada es positivo para el edificio tanto en invierno como en verano, pudiendo ser considerados como estrategias de enfriamiento pasivo que además contribuyen, durante las estaciones cálidas, a la mejora de las condiciones de confort de los usuarios.

Asimismo, se ha comprobado que es posible generar un modelo predictivo del comportamiento térmico de las fachadas vegetales con un excelente grado de precisión. Gracias a este modelo, conociendo las principales características de la climatología del lugar es posible estimar el comportamiento térmico de una fachada vegetal respecto a una fachada convencional.

10.2. Sobre la caracterización

Analizando los resultados de la primera fase de monitorización, llevada a cabo en el cerramiento sin aislante durante casi tres años, se puede concluir que la fachada vegetal objeto de estudio tiene una gran capacidad de disminuir las temperaturas superficiales de los edificios situados en lugares con climas parecidos al analizado en este trabajo. Como es lógico, dicha reducción de las temperaturas tiene como consecuencia una considerable disminución de la demanda energética durante las estaciones cálidas. De hecho, el estudio demuestra cómo se incrementa el efecto de reducción de las temperaturas en la fachada con vegetación a medida que la radiación y las temperaturas exteriores aumentan. Esto significa que la capa vegetal funciona de manera

óptima en los momentos en los que más se requiere.

Cabe destacar que en condiciones propias de verano, durante el 50 % del tiempo se registra una diferencia en la temperatura superficial exterior de las dos fachadas entre 15 °C y 30 °C. Esta diferencia se refleja en la temperatura superficial interior, siendo la correspondiente al módulo con vegetación inferior a la del módulo sin vegetación durante el 99 % de las horas. Este efecto es todavía más evidente durante las tardes de los meses más cálidos del año, registrándose una diferencia media entre la temperatura superficial interior del módulo sin vegetación y la temperatura superficial interior del módulo con vegetación de 8.6 °C, que a su vez se refleja en una diferencia media de temperatura al interior de los módulos de aproximadamente 5.5 °C.

Asimismo, en los meses de primavera y otoño, caracterizados por elevados valores de irradiancia en la superficies verticales orientadas a sur, la fachada vegetal actúa como elemento de sombreado. Esto implica una disminución media de 5 °C en la temperatura superficial interior y de 4 °C en la temperatura interior.

Durante el invierno, los datos están sujetos a una mayor variabilidad y, en general, las diferencias registradas entre los dos módulos son inferiores respecto al caso anterior. En la mayoría de los casos, las temperaturas en el módulo con vegetación son más bajas, pero se dan también ocasiones en los que se verifica la situación contraria. En general, las temperaturas registradas en el módulo con vegetación son más estables.

Por lo tanto, el empleo del sistema vegetal analizado parece oportuno en lugares con condiciones climáticas parecidas a las del caso de estudio, dado que las ventajas proporcionadas durante los meses cálidos son mucho más

relevantes respecto de las posibles desventajas que se puedan dar durante los meses más fríos.

De los análisis de los datos tomados durante la segunda fase de monitorización, realizada en el cerramiento aislado durante el verano de 2012, se puede concluir que el efecto positivo de la vegetación no se ve alterado por la considerable resistencia térmica del cerramiento y que, como se ha destacado en el caso del cerramiento sin aislante, el efecto de la vegetación es más beneficioso durante las horas más cálidas del día. Precisamente, en estos momentos es cuando se registra una diferencia de aproximadamente 7 °C en la temperatura superficial interior media y de aproximadamente 5 °C en la temperatura interior.

Además, el estudio demuestra cómo la integración de fachadas vegetales en los edificios puede considerarse una estrategia de enfriamiento pasivo que contribuye a aumentar el confort para los usuarios durante las estaciones cálidas. Se atribuye este aumento del confort principalmente a dos razones:

- En primer lugar, la temperatura del aire en el interior del módulo con vegetación es en media 4 °C inferior a la temperatura del aire en el módulo sin vegetación. Esto es debido a que la máxima temperatura registrada en la superficie interior del cerramiento con vegetación es en media 5 °C inferior a la máxima temperatura superficial registrada en la superficie interior del otro cerramiento; y, por otro lado, a que la temperatura superficial interior mínima es significativamente inferior a la registrada en el módulo sin vegetación, situándose en la mayoría de los casos por debajo de los 25 °C.

- En segundo lugar, en consecuencia del desfase de la onda térmica provocado por la vegetación (de aproximadamente dos horas), el pico máximo de temperatura en el módulo con vegetación se registra cuando la temperatura del aire en el exterior se encuentra en el rango de confort. Esto implica que se pueda aprovechar la ventilación natural, refrescando durante las horas de máxima temperatura interior. Sin embargo, este hecho resultaría imposible en la fachada sin vegetación, puesto que la temperatura exterior es superior a la temperatura de confort en el momento de pico de temperatura interior.

Por último, cabe destacar que las bajas temperaturas que se registran en la superficie exterior de la fachada vegetal, debidas a la humedad del sustrato, permiten que haya un flujo de energía saliente durante el día y que este flujo sea muy superior al flujo de calor entrante. Por el contrario, en el módulo sin vegetación el flujo de calor entrante es muy superior al flujo de calor saliente, como ocurre en cualquier otro tipo de fachada. Por lo tanto, el módulo con vegetación va progresivamente enfriándose, mientras que el módulo sin vegetación progresivamente se calienta. Todo lo expuesto anteriormente demuestra que, en climas mediterráneos continentales, combinar sustrato y vegetación como acabado de fachada constituye una estrategia de ahorro energético que mejora las condiciones de confort de los usuarios.

10.3. Sobre el modelo predictivo

En el trabajo ha quedado demostrado que es posible generar un modelo predictivo del comportamiento térmico de una fachada vegetal. Gracias a es-

te modelo, es posible predecir la diferencia media de temperatura entre dos ambientes, uno con fachada vegetal y otro sin ella, en función de la temperatura exterior, la humedad relativa del aire en el exterior y la irradiancia global sobre superficie vertical orientada a sur.

El modelo ha sido desarrollado a partir de los datos tomados en la primera fase de monitorización y ha sido validado experimentalmente, mostrando un elevado grado de fiabilidad. De hecho, los resultados del modelo predictivo son muy similares a los datos medidos, reproduciendo la predicción tanto cambios bruscos como inestabilidad de temperatura.

El modelo es funcional en cuanto a la evaluación del ahorro energético asociado a la instalación de fachadas vegetales y a los posibles beneficios térmicos que la colocación de una fachada con estas características puede aportar a los usuarios del edificio.

En síntesis, conociendo las principales características de la climatología (temperatura, humedad relativa e irradiancia) del lugar donde se quiera colocar la fachada vegetal, es posible estimar su comportamiento térmico respecto a una fachada convencional. La estimación del comportamiento se realiza a través de la predicción de las diferencias de temperatura entre las superficies exterior e interior de las fachadas y en el interior, cerca del techo y cerca del suelo.

Los datos obtenidos representan valores promedios calculados en cinco franjas horarias, que recogen cada una las horas del día con comportamiento térmico similar. El hecho de que se trate de valores promedios en lugar de valores instantáneos facilita el cálculo necesario para la estimación del posible ahorro energético derivado de la instalación de la fachada vegetal.

El modelo resulta muy práctico, de rápida y sencilla utilización, posibilitando su uso por parte de cualquier técnico del sector de la edificación. Además, la información requerida para su empleo es fácilmente accesible, estando al alcance de todos aquellos involucrados en el campo de la edificación. A través de este modelo, se pretende proporcionar a todos aquellos que investigan y trabajan en la aplicación y en el desarrollo de fachadas vegetales una herramienta que, siendo a la vez asequible y fiable, posibilite la estimación de los posibles beneficios derivados de la utilización de las fachadas vegetales como alternativa viable a otros tipos de fachada.

10.4. Trabajos futuros

A partir de los distintos aspectos contemplados en esta tesis doctoral, a continuación se proponen líneas de investigación futuras estructuradas en cuatro grupos:

- adaptabilidad del modelo a otros contextos;
- monitorización de edificios reales;
- análisis del coste económico del sistema;
- análisis de condicionantes arquitectónicos-urbanísticos.

10.4.1. Adaptabilidad del modelo a otros contextos

- Verificar la adaptabilidad del modelo predictivo a fachadas con acabados diferentes, realizando los ajustes necesarios según

las propiedades físicas y ópticas de la fachada de referencia y las características de las plantas. Los modelos reproducen el comportamiento de un cerramiento con acabado vegetal de tipo *sedum* y sustrato de características determinadas, mantenido siempre húmedo durante todo el período de monitorización, frente a un cerramiento con acabado metálico. Para aquellos casos en los que se analizarán fachadas con acabados diferentes a los ensayados, es preciso realizar los ajustes necesarios atendiendo a las propiedades físicas y ópticas de la fachada de referencia, además de las características propias del tipo de planta utilizada en la fachada vegetal.

- **Verificar el modelo en cerramientos multicapa con espesores de aislamiento diferente, teniendo en cuenta los modelos de temperatura superficial y utilizándolos como punto de partida para estimar el comportamiento en el interior.** Para ello, sería necesario valorar el efecto de las capas adicionales de la fachada, lo cual no supondría problema alguno, ya que, por un lado, las propiedades térmicas de los materiales convencionales son conocidas y, por otro lado, no habría dificultad en reconstruir el gradiente térmico en las otras capas del cerramiento, una vez sabida la respuesta de la capa vegetal a las condiciones climáticas externas.
- **Verificar el modelo en fachadas con orientaciones diferentes a la sur, ajustando el modelado de a irradiancia.** El hecho de que una de las variables explicativas de los modelos sea la irradiancia sobre superficie vertical orientada a sur supone que, en el caso de estudiar

fachadas con otras orientaciones, se deba ajustar la parte de modelo relativa a la irradiancia, siendo más o menos influyente en base a la orientación de la fachada.

- **Verificar el modelo en lugares con condiciones climáticas diferentes a las estudiadas.** El estudio desarrolla cinco grupos de modelos, agrupando las franjas horarias de comportamiento climático similar. A la hora de utilizar los modelos en lugares caracterizados por condiciones climáticas diferentes a las estudiadas, habrá que considerar si las franjas horarias coinciden con las observadas en el caso de estudio y, en caso contrario, adaptarlas a las nuevas condiciones.

10.4.2. Monitorización de edificios reales

- **Monitorizar edificios reales con fachadas vegetales y verificar la adaptabilidad del modelo a esos contextos.** La tesis se basa en la monitorización de módulos experimentales cuya única carga térmica se debe a la transmisión a través de los cerramientos expuestos al sur. Al tratarse de una carga térmica muy baja, no resulta representativa en comparación con las existentes en edificios en condiciones reales de utilización. Por lo tanto, la monitorización de edificios bajo ese contexto sería necesaria para verificar cómo influyen en el comportamiento térmico de la fachada vegetal y en la adaptabilidad del modelo las cargas térmicas, debidas tanto a los fenómenos de intercambio de calor del edificio con el exterior como a las ganancias interiores.

10.4.3. Coste económico del sistema

- **Verificar si el coste adicional dado por la fachada vegetal se justifica con el ahorro energético que produce** El éxito de cualquier sistema pasa por la rentabilidad económica del mismo. Por esta razón, es necesario calcular el coste de implementación de un sistema de fachada vegetal teniendo en cuenta, además del coste inicial, el relativo a su conservación, reposición y consumo de agua. De este modo, se comprobaría si la inversión se justifica con los beneficios que el sistema proporciona, pudiendo calcular, en su caso, el tiempo de retorno de la inversión.

10.4.4. Condicionantes arquitectónicos-urbanísticos

- **Estudiar la posible aplicación de los diferentes sistemas de fachada vegetal catalogados, teniendo en cuenta tanto el estado en el que se encuentra el edificio como los condicionantes urbanísticos.** La difusión a gran escala de los sistemas de fachada vegetal está condicionada sobre todo a su posible aplicación en edificios existentes. En la mayoría de los casos, los edificios forman parte de una trama urbana que, en sí misma, constituye un factor determinante para su posible aplicación y para la elección de un sistema u otro. Antes de todo, habrá que tener en cuenta el espacio que el sistema ocupa en la calle y las condiciones de soleamiento y sombreado de las fachadas. Asimismo, los factores determinantes de cara al edificio son el peso del sistema, el material y el estado en que se encuentra la fachada. Además,

habrá que verificar el cumplimiento por parte del sistema de los requisitos establecidos por las normas de seguridad contra incendios y de las normas antisísmicas.

10.5. Difusión de resultados

En este apartado se recoge la información básica sobre la patente, los diferentes artículos y las comunicaciones presentadas a congresos con motivo de esta investigación. En el anexo x se encuentra el texto integral de los últimos tres artículos generados gracias a los resultados de esta tesis doctoral. Los tres se han enviado para su publicación en revistas internacionales indexadas, habiendo sido publicado unos de ellos y los otros dos encontrándose en fase de revisión.

10.5.1. Artículos

- *Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate.* Energy and Buildings 63 (2013) pp. 1-14 JCR 2012: 2,809 SJR 2011: 1,377 (Sciverse Scopus).
- *Energy saving and environmental benefits of metal box vegetal facades.* WIT Transactions on Ecology and Environment 127, pp. 325-335 SJR 2011: 0,131 (Sciverse Scopus).
- *Eco architecture: innovative facade design with vegetal elements. Opaque and traslucent wall constructive solutions.* Design Principles and

Practices: An International journal 42 (2010) pp. 103-112 ISSN: 1833-1874.

- *Sistemas vegetales que mejoran la calidad ambiental de las ciudades.* Boletín CF+S 42-43 marzo de 2010, Instituto Juan de Herrera, <http://habitat.aq.upm.es/boletin/n42> ISSN: 1578097X

10.5.2. Patente

- *Cerramiento protector para fachadas* Número de patente o CCP: 2334968 B2 C P 200930810 (7), Fecha de concesión: 07-10-2010

10.5.3. Actas en congresos internacionales

- *Testing the summer performance of a green wall system on an experimental building.* PLEA 2013 (Ponencia aceptada) – Sustainable Architecture for a Renewable Future
- *Green façades for urban comfort improvement. Implementation in a extreme Continental Mediterranean climate.* PLEA 2012 – Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 28th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Lima, Peru (Sciverse Scopus)
- *Energy efficiency of a pre-vegetated modular façade prototype.* PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp. 685-690, Louvain la Neuve, Bélgica (Sciverse scopus)

- *Hygrothermal performance of vegetation on cladding and traslucent façade system.* PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Prooceddings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp. 685-690, Louvain la Neuve, Bélgica (Sciverse scopus)
- *Energy efficiency and environmental benefits of green envelopes in buildings.* 5th Energy Forum on solar building skins, Bressanone, Italia (2010)
- *Energy performance of a garden shutter as a solar protection.* 5th Energy Forum on solar building skins, Bressanone, Italia (2010)
- *Tecnologías verdes como instrumentos de rehabilitación arquitectónica.* Congreso SB 10 MAD, Madrid (2010) ISBN: 978-84-614-1920-3
- *Thermal performance of a lifesize prototype of vegetal facade.* Congreso ICBEST 2010, Vancouver, Canada (2010)
- *Envolvente vegetales como cerramientos sostenibles.* CIBARQ 10 Low carbon city – IV Congreso internacional de Arquitectura, Ciudad y Energia, Pamplona (2010)
- *Sistemas de fachada vegetal opacas.* Congreso de Arquitectura Sostenible, Valladolid (2009)
- *Jardines verticales: estudio y análisis de las soluciones existentes.* IV Congreso mundial de Ingenieros Agrónomos y Profesionales de la Agro-nomía, Madrid (2008)

- *Fachadas vegetales*. Copenmind. Copenhagen forum of research, innovation, technology, Copenhagen (2008)

10.5.4. Actas en congresos nacionales

- *Propuesta constructiva de fachada vegetal industrializable*. III Jornadas sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo III IAU I+D+i, Madrid (2009) ISBN: 978-84-9728-309-0

Capítulo 11

Conclusioni

Il capitolo presenta le principali conclusioni alle quali si perviene in questa tesi, sottolineando in particolare quelle relative alle fasi di studio sperimentale e di sviluppo del modello predittivo del comportamento termico della parete verde. Questi risultati vengono presentati seguendo lo stesso ordine utilizzato nei capitoli precedenti, non esprimendo, pertanto, ordine di importanza relativa.

Dopo il primo paragrafo di conclusioni generali, dove si dimostra la conformità con le ipotesi, nei due paragrafi seguenti si specificano le conclusioni relative alle due fasi di monitoraggio e al modello predittivo. Infine, si presentano le linee di lavoro che la ricerca lascia aperte e i loro possibili futuri sviluppi e si evidenziano le pubblicazioni prodotte durante gli anni nei quali si è svolta la ricerca.

11.1. Conclusioni generali

In questa tesi si dimostra che l'uso di elementi vegetali in facciata è favorevole per l'edificio sia in inverno che in estate, e che le pareti verdi possono essere considerate strategie di raffrescamento passivo che contribuiscono, durante le stagioni calde, al miglioramento delle condizioni di comfort degli utenti.

La tesi dimostra inoltre che è possibile generare un modello predittivo del comportamento termico delle facciate verdi che ne riproduce in maniera affidabile le prestazioni. Grazie a questo modello, conoscendo le principali caratteristiche del clima del luogo è possibile stimare il comportamento termico di una facciata verde rispetto a quello di una facciata convenzionale.

11.2. Conclusioni sulla caratterizzazione

Analizzando i risultati della prima fase del monitoraggio, condotto per quasi tre anni su una facciata verde priva di isolamento, si può concludere che essa ha una gran capacità di ridurre le temperature superficiali di edifici situati in zone con climi simili a quello analizzato in questo documento.

Ovviamente, la riduzione delle temperature si riflette in un significativo calo della domanda energetica durante le stagioni calde. Infatti, lo studio mostra come l'effetto di riduzione delle temperature nella facciata verde aumenta all'aumentare dell'irraggiamento e della temperatura esterna. Ciò significa che la facciata verde funziona in modo ottimale proprio quando si richiede il suo apporto nel controllo della temperatura interna.

Si noti che in condizioni estive durante il 50 % del tempo si registra una differenza di temperatura sulla superficie esterna delle due facciate che oscilla tra 15 celsius e 30 celsius. Questa differenza si riflette sulla temperatura superficiale interna: la temperatura superficiale del modulo con vegetazione si attesta al di sotto della temperatura superficiale del modulo senza vegetazione per il 99 % delle ore monitorate. Questo effetto si amplifica durante i pomeriggi dei mesi più caldi dell'anno, quando si registra una differenza media tra la temperatura della superficie interna del modulo senza vegetazione e la temperatura superficiale interna del modulo con vegetazione di 8.6 celsius, che a sua volta si riflette in una differenza media della temperatura interna di circa 5.5 celsius.

Durante i mesi primaverili e autunnali, caratterizzati da alti valori di irraggiamento sulla superficie verticale esposta a sud, dovuti al fatto che il Sole raggiunge un'elevazione inferiore a quella raggiunta durante l'estate, la facciata verde si comporta come un'ottima protezione solare e l'effetto di ombreggiamento provoca una diminuzione media di 5 celsius sulla temperatura superficiale interna e di 4 celsius sulla temperatura ambiente all'interno dei moduli.

Durante l'inverno, i dati sono soggetti a una maggiore variabilità e, in generale, le differenze osservate tra i due moduli sono inferiori alle differenze osservate nel caso estivo. Anche se nella maggior parte dei casi le temperature nel modulo con vegetazione sono più basse, si sono rilevati casi in cui si verifica la situazione opposta. In generale, le temperature nel modulo con vegetazione sono più stabili.

Pertanto, l'uso del sistema di facciata verde analizzato sembra adatto

in zone con condizioni climatiche simili a quelle del caso di studio poiché i vantaggi prodotti nei mesi caldi sono ampiamente maggiori dei possibili inconvenienti che potrebbero verificarsi durante i mesi più freddi.

Dall'analisi dei dati rilevati nel corso della seconda fase di monitoraggio, condotta su una facciata verde con uno strato di isolamento durante l'estate del 2012, si può concludere che l'effetto positivo della vegetazione non è alterato significativamente dall'elevata resistenza termica serramento e che, come evidenziato nel caso dell'involucro non isolato nella prima fase di monitoraggio, l'effetto della vegetazione è maggiore durante le ore più calde della giornata. In questi momenti infatti si registra una differenza di circa 7 °C nella temperatura superficiale media e di circa 5 celsius nella temperatura ambiente all'interno dei moduli.

Inoltre, lo studio dimostra che le pareti verdi possono essere considerati sistemi passivi di raffrescamento, che contribuiscono ad aumentare il comfort dell'utente durante le stagioni calde. Tale miglioramento del confort è dovuto principalmente a due ragioni:

- in primo luogo, la temperatura dell'aria all'interno del modulo con vegetazione è in media di 4 °C inferiore alla temperatura dell'aria nel modulo senza vegetazione. Questo è dovuto al fatto che la temperatura massima sulla superficie interna del modulo con vegetazione è in media di 5 °C inferiore alla temperatura superficiale massima registrata in corrispondenza della superficie interna dell'altro modulo, e inoltre, al fatto che la temperatura minima della superficie interna del modulo con vegetazione è significativamente inferiore a quella del modulo senza vegetazione, attestandosi in molti casi al di sotto dei 25 °C.

- In secondo luogo, a causa dello sfasamento dell'onda termica di circa due ore causato dalla vegetazione, il picco di temperatura all'interno del modulo con vegetazione si registra nel momento in cui la temperatura dell'aria esterna è nel rango di comfort. Questo significa che, nei momenti di massima temperatura interna, è possibile usufruire della ventilazione naturale come tecnica di raffrescamento passivo. Nel modulo senza vegetazione, al contrario, nel momento di massima temperatura interna, la temperatura esterna è superiore alla temperatura di comfort, non rendendo quindi adatto l'utilizzo della ventilazione naturale come tecnica di raffrescamento passivo.

Infine, si noti che le basse temperature registrate sulla superficie esterna della parete verde, dovute principalmente all'umidità del substrato, determinano che durante il giorno la facciata verde sia attraversata da un un flusso di energia diretto verso l'esterno del modulo e che è, in valore assoluto, molto superiore al flusso di energia entrante, attraverso la stessa parete.

Al contrario, nel modulo senza vegetazione il flusso di energia entrante supera di gran lunga il flusso di energia uscente, come tipicamente avviene in qualsiasi tipo di facciata convenzionale. Pertanto, il modulo con vegetazione sperimenta un raffreddamento progressivo, mentre il modulo senza vegetazione si riscalda progressivamente.

Tutto quanto esposto fino ad ora dimostra che, in clima mediterraneo continentale, la combinazione di substrato e vegetazione come rivestimento di facciata è una strategia di risparmio energetico, che inoltre migliora le condizioni di comfort degli utenti.

section Conclusioni sul modello predittivo La ricerca dimostra che è

possibile generare un modello predittivo del comportamento termico di una parete verde. Grazie a questo modello, conoscendo la temperatura esterna, l'umidità relativa esterna e l'irraggiamento globale sulla superficie sud, è possibile prevedere il comportamento medio dei due moduli, uno con facciata vegetale e uno senza.

Il modello è stato sviluppato a partire dai dati raccolti nella prima fase di monitoraggio ed è stato validato sperimentalmente, mostrando un alto livello di precisione. Infatti, i risultati dei modelli predittivi sono molto simili ai dati misurati, e la previsione è capace di riprodurre sia gli sbalzi di temperatura sia l'instabilità della stessa.

Il modello è funzionale alla valutazione del risparmio energetico e dei potenziali benefici termici per gli utenti di edifici che implementano facciate verdi.

In breve, conoscendo le principali caratteristiche climatiche (temperatura, umidità relativa e irraggiamento) del luogo in cui si desidera installare la facciata verde, è possibile stimare il suo comportamento termico rispetto a quello di una facciata tradizionale. La stima del comportamento è effettuata attraverso la predizione della differenza di temperatura superficiale esterna ed interna e della differenza di temperatura all'interno, vicino al soffitto e in prossimità del suolo.

I dati ottenuti sono valori medi calcolati in cinque fasce orarie, ognuna delle quali raccoglie ore del giorno con comportamento termico analogo. Il fatto che si tratti di valori medi anziché di valori istantanei facilita il calcolo dei potenziali risparmi energetici derivanti dalla installazione della facciata.

Il modello è molto pratico, veloce e semplice da usare, rendendolo fruibile

da qualsiasi tecnico che opera nel campo dell'edilizia. Inoltre, le informazioni necessarie per il suo uso sono facilmente accessibili, essendo a disposizione di tutti gli operatori del settore.

Attraverso questo modello si vuole fornire, a tutti coloro che investigano e lavorano sullo sviluppo e sull'applicazione di facciate verdi, uno strumento che essendo contemporaneamente affidabile e facile da usare, consenta la stima dei possibili vantaggi derivanti dall'utilizzo di facciate vegetali come alternative valide ad altri tipi di facciata.

11.3. Linee di ricerca aperte

Partendo dai diversi aspetti oggetto di questa tesi, si propongono linee di ricerca future strutturate in quattro gruppi:

- adattabilità del modello ad altri contesti;
- monitoraggio di edifici reali;
- analisi dei costi economici del sistema;
- analisi dei condizionanti architettonico-urbani.

11.3.1. Adattabilità del modello ad altri contesti

- **Verificare l'adattabilità del modello predittivo a facciate con finiture diverse, realizzando gli adeguamenti necessari dovuti alle proprietà fisiche e ottiche della facciata di riferimento e alle caratteristiche delle piante.** Il modello riproduce il comportamento di un serramento con finitura vegetale realizzata con piante tipo

sedum e substrato con caratteristiche specifiche che viene sempre mantenuto umido durante tutto il periodo di monitoraggio, a fronte di un serramento con finitura metallica. Nel caso in cui si analizzino facciate con finiture differenti, si dovranno apportare le modifiche necessarie in risposta alle proprietà fisiche ed ottiche della facciata di riferimento oltre che a quelle corrispondenti al tipo di piante utilizzate nella facciata vegetale.

- **Verificare il modello in facciate multistrato con differenti spessori di isolamento, tenendo in considerazione i modelli di temperatura superficiale e utilizzando i risultati come punto di partenza per stimare il comportamento all'interno.** A tal fine, sarebbe necessario valutare l'effetto degli strati addizionali, che per altro non comporterebbe alcun problema, in quanto sono note sia le proprietà termiche dei materiali convenzionali sia la risposta della vegetazione alle condizioni climatiche esterne (modello predittivo). La ricostruzione del gradiente termico negli altri strati della facciata non presenta quindi particolari difficoltà.
- **Verificare il modello in facciate con orientamenti differenti al sud, adattando la modellizzazione dell'irraggiamento.** Il fatto che una delle variabili esplicative del modello sia l'irraggiamento su superficie verticale orientata a sud, implica che, nel caso di voler studiare facciate con altri orientamenti, dovrà essere modificata la parte di modello relativa all'irraggiamento, dato che la sua influenza cambia al variare dell'orientamento della facciata. item **Verificare il modello**

in zone con condizioni climatiche diverse da quelle studiate.

Lo studio sviluppa cinque gruppi di modelli, individuando fasce orarie con comportamento climatico simile. Nel caso in cui si voglia usare il modello in luoghi con condizioni climatiche diverse da quelle studiate, si dovrà analizzare se le fasce orarie corrispondono a quelle osservate nel caso di studio e, in caso contrario, adattarle alle nuove condizioni.

11.3.2. Monitoraggio di edifici reali

- **Monitorare edifici reali con facciate verdi e verificare l'adattabilità del modello a questi contesti.** La tesi si basa sul monitoraggio di moduli sperimentali i cui unici carichi sono dovuti alla trasmissione di calore attraverso le pareti esposte a sud. Essendo i carichi termici molto piccoli, essi non sono rappresentativi dei carichi esistenti in edifici in condizioni reali di utilizzo. Pertanto, il monitoraggio di edifici in queste condizioni sarebbe necessario al fine di verificare qual'è l'influenza dei carichi, dovuti sia ai fenomeni di scambio termico con l'esterno sia ai guadagni interni, sul comportamento termico della facciata e sulla possibilità di applicazione del modello.

11.3.3. Costo economico del sistema

- **Verificare se il costo aggiuntivo dato dalla facciata è giustificato dai risparmi energetici da essa prodotti.** La diffusione di qualsiasi sistema innovativo dipende, in gran misura, dalla sua redditività. Per questo motivo è necessario calcolare il costo di implementazione del

sistema di facciata verde tenendo conto, oltre il costo iniziale, gli oneri di conservazione, manutenzione e i costi dovuti al consumo di acqua. In questo modo si potrebbe calcolare il tempo di ritorno dell'investimento e verificare se esso è giustificato dai benefici che il sistema fornisce.

11.3.4. Condizionanti architettonico-urbani

- **Studiare la possibile applicazione delle facciate verdi catalogate, tenendo in considerazione sia lo stato in cui si trova l'edificio sia i condizionamenti urbani.** La diffusione capillare di facciate verdi negli edifici è condizionata principalmente dalla loro possibile installazione in edifici esistenti. Nella maggior parte dei casi, gli edifici fanno parte di una configurazione urbana che, di per sé, è un fattore che assume un'importanza determinante rispetto alla possibilità di applicazione di elementi vegetali in facciata oltre che rispetto alla scelta di un sistema piuttosto che di un altro. Innanzitutto bisognerà considerare lo spazio che il sistema occupa in strada e le condizioni di soleggiamento e ombreggiamento delle facciate. Inoltre, rispetto all'edificio, i fattori fondamentali saranno il peso del sistema, il materiale e lo stato di conservazione della facciata. Oltre a quanto già detto, bisognerà considerare se il sistema rispetta i requisiti stabiliti dalle norme di sicurezza antincendio e dalla normativa antisismica.

11.4. Diffusione dei risultati

Questa sezione contiene informazioni di base sul brevetto, i diversi articoli e i paper presentati a convegni, scaturiti da questa tesi di dottorato. Nell'allegato X si trova il testo integrale degli ultimi tre articoli derivati dai risultati di questa tesi. Tutti sono stati presentati per la loro pubblicazione su riviste internazionali: uno è già stato pubblicato e gli altri due sono attualmente in fase di revisione.

11.4.1. Articoli

- *Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate.* Energy and Buildings 63 (2013) pp. 1-14 JCR 2012: 2,809 SJR 2011: 1,377 (Sciverse Scopus).
- *Energy saving and environmental benefits of metal box vegetal facades.* WIT Transactions on Ecology and Environment 127, pp. 325-335 SJR 2011: 0,131 (Sciverse Scopus).
- *Eco architecture: innovative facade design with vegetal elements. Opaque and traslucent wall constructive solutions.* Design Principles and Practices: An International journal 42 (2010) pp. 103-112 ISSN: 1833-1874.
- *Sistemas vegetales que mejoran la calidad ambiental de las ciudades.* Boletín CF+S 42-43 marzo de 2010, Instituto Juan de Herrera,

<http://habitat.aq.upm.es/boletin/n42> ISSN: 1578097X

11.4.2. Brevetto

- *Cerramiento protector para fachadas* Número de patente o CCP: 2334968
B2 C P 200930810 (7), Fecha de concesión: 07-10-2010

11.4.3. Atti di congressi internazionali

- *Testing the summer performance of a green wall system on an experimental building.* PLEA 2013 (Ponencia aceptada) – Sustainable Architecture for a Renewable Future
- *Green façades for urban comfort improvement. Implementation in a extreme Continental Mediterranean climate.* PLEA 2012 – Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 28th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Lima, Peru (Sciverse Scopus)
- *Energy efficiency of a pre-vegetated modular façade prototype.* PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, pp. 685-690, Louvain la Neuve, Bélgica (Sciverse scopus)
- *Hygrothermal performance of vegetation on cladding and traslucent façade system.* PLEA 2011 - Architecture and Sustainable Development, Conference Proceedings of the 27th International Conference on Passive

and Low Energy Architecture, pp. 685-690, Louvain la Neuve, Bélgica (Sciverse scopus)

- *Energy efficiency and environmental benefits of green envelopes in buildings*. 5th Energy Forum on solar building skins, Bressanone, Italia (2010)
- *Energy performance of a garden shutter as a solar protection*. 5th Energy Forum on solar building skins, Bressanone, Italia (2010)
- *Tecnologías verdes como instrumentos de rehabilitación arquitectónica*. Congreso SB 10 MAD, Madrid (2010) ISBN: 978-84-614-1920-3
- *Thermal performance of a lifesize prototype of vegetal facade*. Congreso ICBEST 2010, Vancouver, Canada (2010)
- *Envolvente vegetales como cerramientos sostenibles*. CIBARQ 10 Low carbon city – IV Congreso internacional de Arquitectura, Ciudad y Energia, Pamplona (2010)
- *Sistemas de fachada vegetal opacas*. Congreso de Arquitectura Sostenible, Valladolid (2009)
- *Jardines verticales: estudio y análisis de las soluciones existentes*. IV Congreso mundial de Ingenieros Agrónomos y Profesionales de la Agronomía, Madrid (2008)
- *Fachadas vegetales*. Copenmind. Copenhagen forum of research, innovation, technology, Copenhagen (2008)

11.4.4. Atti di congressi nazionali

- *Propuesta constructiva de fachada vegetal industrializable*. III Jornadas sobre Investigación en Arquitectura y Urbanismo III IAU I+D+i, Madrid (2009) ISBN: 978-84-9728-309-0

Bibliografía

- [1] *Green Roofs: Ecological Design And Construction*. Schiffer Publishing, Limited, 2005.
- [2] Paolo Abram. *Giardini pensili. Coperture a verde e gestione delle acque meteoriche*. Sistemi Editoriali, 2004.
- [3] Paolo Abram. *Il verde pensile. Progettazione dei sistemi. Manutenzione*. Sistemi Editoriali, 2011.
- [4] Hashem Akbari, Mat Santamouris, Sahar N. Kharrufa, and Yahyah Adil. Upgrading the building envelope to reduce cooling loads. *Energy and Buildings*, 55:389–396, 2012.
- [5] Hashem Akbari, Mat Santamouris, M. Zinzi, and S. Agnoli. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55:66–76, 2012.
- [6] Eleftheria Alexandri and Phil Jones. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4):480–493, April 2008.

-
- [7] Fabrizio Ascione, Nicola Bianco, Filippo de' Rossi, Gianluca Turni, and Giuseppe Peter Vanoli. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104:845–859, 2013.
- [8] Shady Attia, Liliana Beltrán, André De Herde, and Jan Hensen. “ARCHITECT FRIENDLY ”: A COMPARISON OF TEN DIFFERENT BUILDING PERFORMANCE SIMULATION TOOLS. pages 204–211, 2009.
- [9] Oscar E. Bellini and Laura Daglio. *Verde verticale. Soluzioni tecniche nella realizzazione di living walls e green façades*. 2009.
- [10] Antonella Bellomo. *Pareti verdi: linee guida alla progettazione*. Sistemi Editoriali, 2003.
- [11] Tijana Blanus, M. Madalena Vaz Monteiro, Federica Fantozzi, Eleni Vysini, Yu Li, and Ross W.F. Cameron. Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Building and Environment*, 59:99–106, 2013.
- [12] Sergio Boixo, Marian Diaz-Vicente, Antonio Colmenar, and Manuel Alonso Castro. Potential energy savings from cool roofs in Spain and Andalusia. *Energy*, 38(1):425–438, 2012.
- [13] Rohini Brahme, Z O'Neill, William Sisson, and Kevin Otto. Using existing whole building energy tools for designing net-zero energy buildings—challenges and workarounds. *Proceedings of 11th International ...*, pages 9–16, 2009.

-
- [14] Adrien Brun, Clara Spitz, Etienne Wurtz, and Laurent Mora. Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building. *Eleventh International IBPSA . . .*, pages 1185–1190, 2009.
- [15] Timothy Carter and Andrew Keeler. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of environmental management*, 87(3):350–63, May 2008.
- [16] Michael Cesarz, Manina Ferreira-Erlenbach, and Cornelia Tomerius. *Meydan shopping square: ein neuer Prototyp von Foa*. Jovis, 2007.
- [17] Ni-Bin Chang, Brian John Rivera, and Martin P. Wanielista. Optimal design for water conservation and energy savings using green roofs in a green building under mixed uncertainties. *Journal of Cleaner Production*, 19(11):1180–1188, July 2011.
- [18] Qiuyu Chen, Baofeng Li, and Xiaohu Liu. An experimental evaluation of the living wall system in hot and humid climate. *Energy and Buildings*, 61:298–307, 2013.
- [19] C.Y. Cheng, Ken K.S. Cheung, and L.M. Chu. Thermal performance of a vegetated cladding system on facade walls. *Building and Environment*, 45(8):1779–1787, August 2010.
- [20] Stefano Paolo Corgnati, Enrico Fabrizio, Marco Filippi, and Valentina Monetti. Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. *Applied Energy*, 102:983–993, February 2013.

-
- [21] DB Crawley, JW Hand, M Kummert, and BT Griffith. Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Technical Report July, 2008.
- [22] Beth Anne Currie and Brad Bass. Estimates of air pollution mitigation with green plants and green roofs using the UFORE model. *Urban Ecosystems*, 11(4):409–422, April 2008.
- [23] Antoni Falcón. *Espacios verdes para una ciudad sostenible : planificación, proyecto, mantenimiento y gestión*. Editorial Gustavo Gili, S.L., 2007.
- [24] Chi Feng, Qinglin Meng, and Yufeng Zhang. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6):959–965, June 2010.
- [25] R. Fioretti, a. Palla, L.G. Lanza, and P. Principi. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8):1890–1904, August 2010.
- [26] Matteo Fiori. *Coperture a verde. Green Roof. Progetto ed esecuzione per l'edificio sostenibile*. Hoepli, 2011.
- [27] Matteo Fiori and Tiziana Poli. *Coperture a verde*. Maggioli Editore, 2008.
- [28] Teresa Galí-Izard. *Los mismos paisajes: ideas e interpretaciones*. Gustavo Gili, 2005.

-
- [29] Ezequiel Usón Guardiola. *La Nueva Sensibilidad Ambiental en la Arquitectura Española, 2000-2006*. Clipmèdia Edicions, 2007.
- [30] Hongming He and C.Y. Jim. Simulation of thermodynamic transmission in green roof ecosystem. *Ecological Modelling*, 221(24):2949–2958, December 2010.
- [31] CHM HILL. LID Solutions for an Industrial Site. 2005.
- [32] Chi P. Hoang, Kerry a. Kinney, and Richard L. Corsi. Ozone removal by green building materials. *Building and Environment*, 44(8):1627–1633, August 2009.
- [33] TaeHoon Hong, JiMin Kim, and ChoongWan Koo. LCC and LCCO₂ analysis of green roofs in elementary schools with energy saving measures. *Energy and Buildings*, 45:229–239, February 2012.
- [34] Graeme Hopkins and Christine Goodwin. *Living Architecture: Green Roofs and Walls*. Csiro Publishing, 2011.
- [35] Issa Jaffal, Salah-Eddine Ouldboukhitine, and Rafik Belarbi. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43:157–164, July 2012.
- [36] C.Y. Jim and Hongming He. Estimating heat flux transmission of vertical greenery ecosystem. *Ecological Engineering*, 37(8):1112–1122, August 2011.

- [37] C.Y. Jim and Lilliana L.H. Peng. Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11(1):73–85, January 2012.
- [38] C.Y. Jim and S.W. Tsang. Biophysical properties and thermal performance of an intensive green roof. *Building and Environment*, 46(6):1263–1274, June 2011.
- [39] Manfred Köhler. Green facades—a view back and some visions. *Urban Ecosystems*, 11(4):423–436, May 2008.
- [40] Lisa Kosareo and Robert Ries. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7):2606–2613, July 2007.
- [41] G. Kotsiris, a. Androutsopoulos, E. Polychroni, and P.a. Nektarios. Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs. *Energy and Buildings*, 45:240–249, February 2012.
- [42] Abhay Kumar, M N V Prasad, and Oksana Sytar. Lead toxicity, defense strategies and associated indicative biomarkers in *Talinum triangulare* grown hydroponically. *Chemosphere*, 89(9):1056–65, November 2012.
- [43] Anna Lambertini and Mario Ciampi. *Giardini in verticale*. Verba Volant, 2007.
- [44] R. M. Lazzarin, A. Gasparella, and A. D’Ascanio. Analysis of a green roof application to an industrial building. *International Journal of Ambient Energy*, 24(1):35–43, January 2003.

-
- [45] Renato M. Lazzarin, Francesco Castellotti, and Filippo Busato. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12):1260–1267, December 2005.
- [46] Danny H.W. Li, Liu Yang, and Joseph C. Lam. Zero energy buildings and sustainable development implications – A review. *Energy*, 54:1–10, 2013.
- [47] Autor María and Teresa Cuervo. La simulación energética como herramienta de predicción , normativa y de investigación en proyectos de arquitectura eficientes.
- [48] Heiner Markert, Andreas Knoblauch, and Günther Palm. Modelling of syntactical processing in the cortex. *Bio Systems*, 89(1-3):300–15, 2007.
- [49] Ryan Martens, Brad Bass, and Susana Saiz Alcazar. Roof–envelope ratio impact on green roof energy performance. *Urban Ecosystems*, 11(4):399–408, April 2008.
- [50] Brian Vad Mathiesen, Neven Duic, Ingo Stadler, Gianfranco Rizzo, Zvonimir Guzovic, Giorgia Peri, Marzia Traverso, and Matthias Finkbeiner. The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 48(1):406–414, 2012.
- [51] Ugo Mazzali, Fabio Peron, Piercarlo Romagnoni, Riccardo M. Pulselli, and Simone Bastianoni. Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. *Building and Environment*, 64:57–66, 2013.

-
- [52] F a Memon, Z Zheng, D Butler, C Shirley-Smith, S Lui, C Makropoulos, and L Avery. Life cycle impact assessment of greywater recycling technologies for new developments. *Environmental monitoring and assessment*, 129(1-3):27–35, June 2007.
- [53] Gernot Minke and Denise Entz Lagrotta. *Techos verdes: Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Merlin, 2010.
- [54] Seth S. Moody and David J. Sailor. Development and application of a building energy performance metric for green roof systems. *Energy and Buildings*, 60:262–269, 2013.
- [55] a Niachou and K Papakonstantinou. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and ...*, 33(7):719–729, 2001.
- [56] ERICA OBERNDORFER, JEREMY LUNDHOLM, BRAD BASS, REID R. COFFMAN, HITESH DOSHI, NIGEL DUNNETT, STUART GAFFIN, MANFRED KÖHLER, KAREN K. Y. LIU, and BRADLEY ROWE. Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *BioScience*, 57(10):823, November 2007.
- [57] Marc Ottelé, Katia Perini, a.L.a. Fraaij, E.M. Haas, and R. Raiteri. Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems. *Energy and Buildings*, 43(12):3419–3429, December 2011.
- [58] Marc Ottelé, Hein D. van Bohemen, and Alex L.a. Fraaij. Quantifying the deposition of particulate matter on climber vegetation on living walls. *Ecological Engineering*, 36(2):154–162, February 2010.

-
- [59] Salah-Eddine Ouldboukhitine, Rafik Belarbi, and Rabah Djedjig. Characterization of green roof components: Measurements of thermal and hydrological properties. *Building and Environment*, 56:78–85, 2012.
- [60] a. Palla, I. Gnecco, and L. G. Lanza. Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof. *Hydrological Processes*, 26(1):73–84, January 2012.
- [61] Yiqun Pan, Mingming Zuo, and Gang Wu. Whole building energy simulation and energy saving potential analysis of a large public building. *Journal of Building Performance Simulation*, pages 129–136, 2011.
- [62] G. Pérez, L. Rincón, a. Vila, J.M. González, and L.F. Cabeza. Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4):1861–1867, April 2011.
- [63] Gabriel Pérez, Lúdia Rincón, Anna Vila, Josep M. González, and Luisa F. Cabeza. Green vertical systems for buildings as passive systems for energy savings. *Applied Energy*, 88(12):4854–4859, December 2011.
- [64] Katia Perini, Marc Ottelé, a.L.a. Fraaij, E.M. Haas, and Rossana Raiteri. Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. *Building and Environment*, 46(11):2287–2294, November 2011.
- [65] Katia Perini and Paolo Rosasco. Cost–benefit analysis for green façades and living wall systems. *Building and Environment*, 70:110–121, 2013.

- [66] Michael Pollock and Ya Roderick. Building simulation as an assisting tool in designing an energy efficient building: A case study. . . . *Solutions Limited, White . . .*, 2009.
- [67] La Rochelle. Scopus - Print (51 July 2012)
<http://www.scopus.com/citation/print.url?origin=resultslist&sid=CizB...>
(July):1–21, 2012.
- [68] D.J. Sailor. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8):1466–1478, January 2008.
- [69] Susana Saiz, Christopher Kennedy, Brad Bass, and Kim Pressnail. Comparative Life Cycle Assessment of Standard and Green Roofs. *Environmental Science & Technology*, 40(13):4312–4316, July 2006.
- [70] M. Santamouris, C. Pavlou, P. Doukas, G. Mihalakakou, a. Synnefa, a. Hatzibiros, and P. Patargias. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. *Energy*, 32(9):1781–1788, September 2007.
- [71] Adam Scherba, David J. Sailor, Todd N. Rosenstiel, and Carl C. Wamser. Modeling impacts of roof reflectivity, integrated photovoltaic panels and green roof systems on sensible heat flux into the urban environment. *Building and Environment*, 46(12):2542–2551, December 2011.
- [72] RE Shannon. Introduction to the art and science of simulation. *Simulation Conference Proceedings, 1998. . . .*, pages 7–14, 1998.

-
- [73] Samar Sheweka and Arch. Nourhan Magdy. The Living walls as an Approach for a Healthy Urban Environment. *Energy Procedia*, 6:592–599, January 2011.
- [74] Annibale Sicurella. *Progettare il verde*. Sistemi Editoriali, 2010.
- [75] Edmund C. Snodgrass and Linda McIntyre. *The Green Roof Manual: A Professional Guide to Design, Installation, and Maintenance*. Timber Press, 2010.
- [76] WD Solecki and JM Welch. Urban parks: green spaces or green walls? *Landscape and Urban Planning*, 32:93–106, 1995.
- [77] Graig Spolek. Performance monitoring of three ecoroofs in Portland, Oregon. *Urban Ecosystems*, 11(4):349–359, May 2008.
- [78] Virginia Stovin, Gianni Vesuviano, and Hartini Kasmin. The hydrological performance of a green roof test bed under UK climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 414-415:148–161, January 2012.
- [79] David P B T B Strik, Ruud a Timmers, Marjolein Helder, Kirsten J J Steinbusch, Hubertus V M Hamelers, and Cees J N Buisman. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in biotechnology*, 29(1):41–9, January 2011.
- [80] Pasinee Sunakorn and Chanikarn Yimprayoon. Thermal Performance of Biofacade with Natural Ventilation in the Tropical Climate. *Procedia Engineering*, 21:34–41, January 2011.

-
- [81] T Susca, S R Gaffin, and G R Dell'osso. Positive effects of vegetation: urban heat island and green roofs. *Environmental pollution (Barking, Essex : 1987)*, 159(8-9):2119–26, 2011.
- [82] Irina Susorova, Melissa Angulo, Payam Bahrami, and Brent Stephens. A model of vegetated exterior facades for evaluation of wall thermal performance. *Building and Environment*, 67:1–13, 2013.
- [83] Valeria Tatano. *Verde. Naturalizzare in verticale*. Maggioli Editore, 2008.
- [84] The Mendeley Support Team. Getting Started with Mendeley, 2011.
- [85] Theodore G Theodosiou. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 35(9):909–917, October 2003.
- [86] S.W. Tsang and C.Y. Jim. Theoretical evaluation of thermal and energy performance of tropical green roofs. *Energy*, 36(5):3590–3598, May 2011.
- [87] Athanassios Tzempelikos, Andreas K. Athienitis, and Panagiota Karava. Simulation of façade and envelope design options for a new institutional building. *Solar Energy*, 81(9):1088–1103, September 2007.
- [88] Chris Van Uffelen. *FaçadeGreenery: Contemporary Landscaping*. Braun Publishing AG, 2011.
- [89] Edgar L. Villarreal, Annette Semadeni-Davies, and Lars Bengtsson. Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Ecological Engineering*, 22(4-5):279–298, July 2004.

-
- [90] Susan Weiler and Katrin Scholz-Barth. *Green Roof Systems: A Guide to the Planning, Design, and Construction of Landscapes over Structure (Google eBook)*. John Wiley & Sons, 2011.
- [91] Leigh J. Whittinghill and D. Bradley Rowe. Salt tolerance of common green roof and green wall plants. *Urban Ecosystems*, 14(4):783–794, February 2011.
- [92] P De Wilde and D Prickett. Preconditions for the use of simulation in M&E engineering. *Proceedings 11th International IBPSA ...*, (2008):414–419, 2009.
- [93] Nyuk Hien Wong and Steve Kardinal Jusuf. GIS-based greenery evaluation on campus master plan. *Landscape and Urban Planning*, 84(2):166–182, February 2008.
- [94] Nyuk Hien Wong, Alex Yong Kwang Tan, Yu Chen, Kannagi Sekar, Puay Yok Tan, Derek Chan, Kelly Chiang, and Ngian Chung Wong. Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(3):663–672, March 2010.
- [95] Nyuk Hien Wong, Alex Yong Kwang Tan, Puay Yok Tan, Kelly Chiang, and Ngian Chung Wong. Acoustics evaluation of vertical greenery systems for building walls. *Building and Environment*, 45(2):411–420, February 2010.
- [96] Nyuk Hien Wong, Alex Yong Kwang Tan, Puay Yok Tan, and Ngian Chung Wong. Energy simulation of vertical greenery systems. *Energy and Buildings*, 41(12):1401–1408, December 2009.

-
- [97] Nyuk Hien Wong, Su Fen Tay, Raymond Wong, Chui Leng Ong, and Angelia Sia. Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 38(3):499–509, March 2003.
- [98] Da Yan, Jianjun Xia, Waiyin Tang, Fangting Song, Xiaoliang Zhang, and Yi Jiang. DeST — An integrated building simulation toolkit Part I: Fundamentals. *Building Simulation*, 1(2):95–110, June 2008.
- [99] Yu Kuang Zhao, Chi Chau Lien, Lei Wei, and Wen Pei Sung. Experimental and Simulating Analyses of the Insulating Efficiency of Green Roofs. *Applied Mechanics and Materials*, 121-126:2453–2458, January 2012.