



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA

TESIS DOCTORAL

# ESTUDIO HIDROTÉRMICO DE CUBIERTAS AJARDINADAS. ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO PARA UNA MAYOR EFICIENCIA ENERGÉTICA

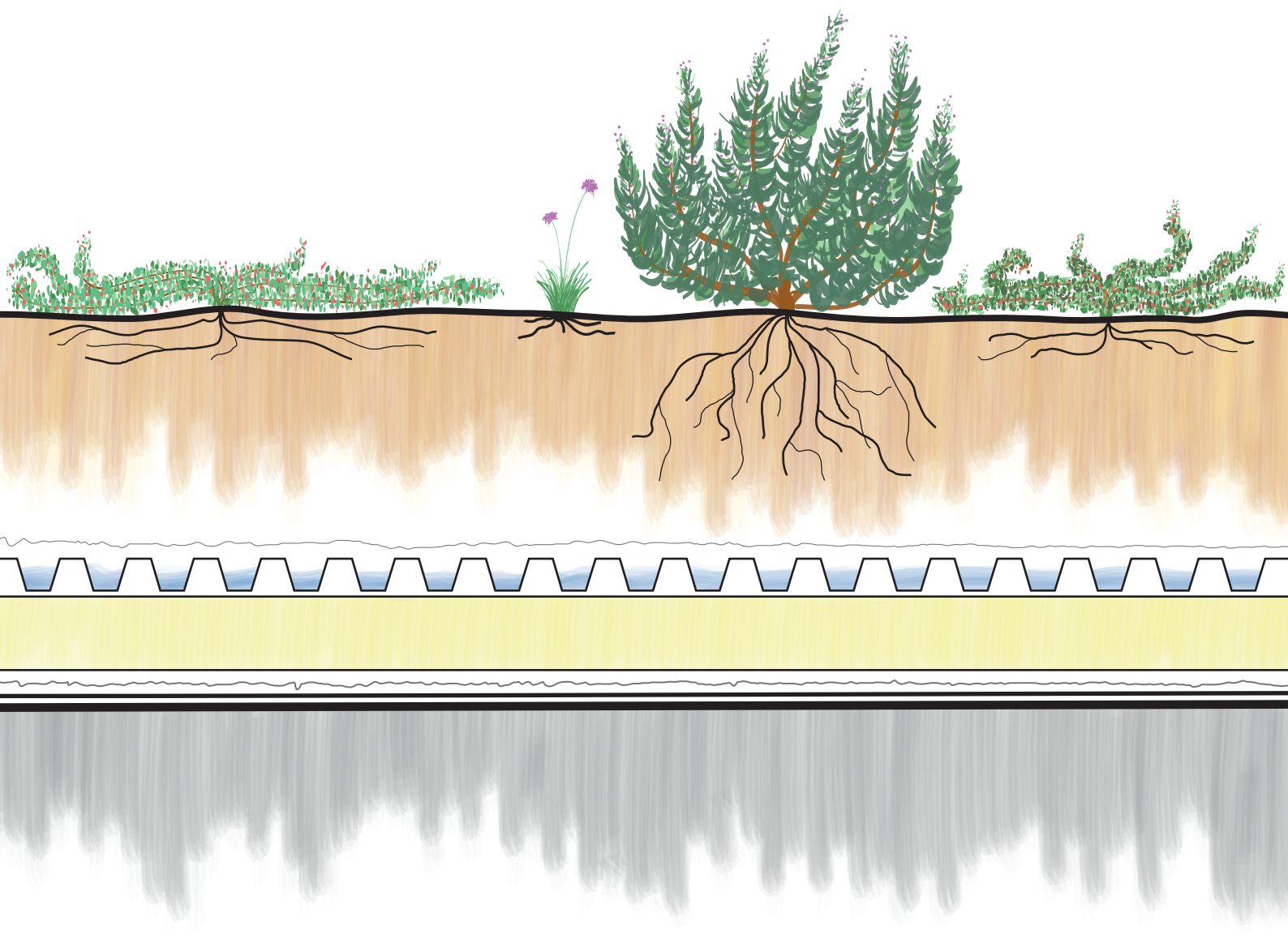
Júlia Garcia Borràs

DIRECTORES

Dra. Ángeles Mas Tomás

Dr. Carlos Lerma Elvira

Mayo 2023







UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCOLA TÈCNICA  
SUPERIOR  
D'ARQUITECTURA

Universitat Politècnica de València  
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO HIDROTÉRMICO DE CUBIERTAS AJARDINADAS.  
ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES DE DISEÑO  
PARA UNA MAYOR EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Presentada por:

**Júlia Garcia Borràs**

Directores:

Dra. Ángeles Mas Tomás

Dr. Carlos Lerma Elvira

Mayo 2023



*Als meus iaïos,  
per tot i per sempre*





## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, el mayor de los agradecimientos hacia los directores de esta tesis doctoral. A la Dra. Ángeles Mas Tomás, por transmitirme la pasión por la construcción, las cubiertas y el dibujo, así como por haber sido una mentora magnífica. Al Dr. Carlos Lerma Elvira por el incontable apoyo prestado, tiempo invertido y la comprensión durante todo este proceso. Os agradezco la dedicación mostrada en la dirección de esta tesis y en mi formación a lo largo de estos años.

Al Servicio de Infraestructuras de la Universitat Politècnica de València (UPV), especialmente a Ángel Vicente Martínez Sancho, por brindarme la oportunidad de ubicar los modelos a escala de las cubiertas realizadas para esta tesis en un espacio dentro de la propia Universidad, así como por el tiempo dedicado durante el montaje y funcionamiento de estas maquetas.

A Álvaro Muñoz Sánchez, de la Unidad de Medio Ambiente de la UPV, por las facilidades ofrecidas para obtener datos meteorológicos de la estación de la Agencia Estatal de Meteorológica (AEMET) ubicada en el Campus de Vera.

A la empresa ZinCo Cubiertas Ecológicas S.L., a la cual me gustaría agradecer el suministro de materiales necesarios para la ejecución de los modelos a escala de las cubiertas ajardinadas. Concretamente, a su Director Comercial, Jorge del Préstamo Fernández, por todas las gestiones realizadas y el apoyo y conocimientos ofrecidos.

Al Grupo CRIDA & Projects S.L., en especial a Carlos Mateo Solano, por ofrecer asesoramiento y el suministro de materiales empleados en la construcción de los modelos a escala.

Y a todos los compañeros que durante estos años han mostrado su interés y apoyo en la elaboración de esta tesis doctoral, prestando su tiempo, opiniones o ideas para la mejora de este proyecto.

En el ámbito personal, me gustaría dedicarle esta tesis, especialmente, a mis amigos. Han sido una verdadera familia que me ha acogido y escuchado con comprensión. En concreto quiero mostrar mis agradecimientos a tres personas. *A Carlos Corredera, per estar al meu costat cada dia, amb una deriva, una historia o una resposta baix el braç. A Xavi David, perquè sempre m'has ajudat a trobar el camí i la teua sinceritat ha sigut la meua millor teràpia.* Y a Noelia López, por los muchos años pasados a mi lado y porque tengo claro que eres quien mejor comprende todo el camino recorrido.

*A la meua família, ja que d'ells vaig aprendre que, amb esforç, es poden aconseguir moltes coses. En especial a la meua iaia. Ningú ha cregut en mi com ho vas fer tu, i em vas mostrar que era possible arribar fins aquí.*

Y, por supuesto, a Jesús Collado, por haber vivido lo mejor y lo peor de esta aventura. No podría haber imaginado una compañía en este camino más paciente, comprensiva y cariñosa. Gracias por ser mi apoyo más fuerte.







Las cubiertas ajardinadas forman parte de las soluciones, diseños y sistemas constructivos de la arquitectura sostenible. El equilibrio entre las dimensiones ambiental, social y económica en aras de conseguir el máximo bienestar y desarrollo de nuestras sociedades influye en cómo se construye. La rehabilitación energética de un parque de viviendas cada día más envejecido y deteriorado permite reducir el consumo energético desde dos puntos de vista: aprovechando recursos ya existentes, al ampliar la vida útil de edificios todavía estructuralmente funcionales, pero en una condiciones térmicas, de salubridad o equipamiento deficientes; y reduciendo el consumo energético de estos edificios, con los beneficios que ello supone para el medio ambiente, la economía y el bienestar social de sus usuarios y del entorno.

En la presente tesis doctoral se profundiza en el comportamiento energético y térmico de las cubiertas ajardinadas en rehabilitación, estructurándose en dos apartados que abordan el estudio de la reducción del consumo energético y las consideraciones constructivas para una correcta ejecución de estos sistemas ajardinados.

En el primer apartado se analiza la distribución de temperaturas y humedades relativas en las diferentes capas de modelos reales a escala de cubiertas ajardinadas. Las conclusiones extraídas de estos datos tomados mediante *data-loggers*, para la ciudad de València, se comparan con el funcionamiento de los mismos sistemas constructivos de cubierta, diseñados y simulados a través de modelos informáticos. Este proceso permite estudiar no solo el comportamiento térmico de la cubierta, sino también su funcionamiento energético y el posible ahorro a conseguir en diferentes hipótesis de rehabilitación de una vivienda, considerando también la posible intervención sobre otros elementos de la envolvente térmica.

El mecanismo de evapotranspiración presenta un papel importante en la disipación de calor de las cubiertas ajardinadas, por lo que se profundiza en su estudio para el caso de cubiertas autosuficientes, es decir, sin aporte de agua de riego. Este sistema de cubierta ajardinada pretende responder a la problemática escasez de agua a la que se enfrenta parte del territorio español, especialmente en la costa mediterránea en la que se ubica la ciudad de València. También se profundiza en la comprensión sobre qué variables climáticas, de entre temperatura ambiente, radiación solar y precipitaciones, son más influyentes en este proceso. La relación de la evapotranspiración con el agua almacenada, en las capas de la cubierta dispuestas a tal fin, queda patente, reduciéndose este proceso a menor disponibilidad de agua, especialmente en climas como el mediterráneo, con escasas precipitaciones y elevada temperatura ambiental y radiación solar. Todas las reflexiones obtenidas permiten confirmar las limitaciones en las pérdidas de calor por evapotranspiración derivadas de la escasez de agua, lo que conlleva la necesidad de buscar posibles soluciones que mejoren su comportamiento energético. Cada una de las situaciones estudiadas, conocidas y planteadas sus debilidades y fortalezas, permite concluir cuál es el mejor sistema constructivo de cubierta ajardinada para el caso de rehabilitación, principal aportación de este trabajo.

En el segundo y último apartado, se realiza el estudio constructivo de una rehabilitación mediante el sistema de cubierta ajardinada escogido previamente. Esto permite detectar y conocer los problemas y soluciones que afrontar para conseguir una correcta ejecución, la cual supondrá mejorar la accesibilidad, mantenimiento, sostenibilidad y vida útil del sistema ajardinado de cubierta. Comprender el comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas, así como las particularidades de instalación y construcción, permite ampliar su difusión, aplicación y los beneficios ambientales, sociales y económicos que de su uso se derivan.





Les cobertes enjardinades formen part de les solucions, dissenys i sistemes constructius de l'arquitectura sostenible. L'equilibri entre les dimensions ambiental, social i econòmica a fi d'aconseguir el màxim benestar i desenvolupament de les nostres societats influeix en com es construeix. La rehabilitació energètica d'un parc d'habitatges cada dia més envellit i deteriorat permet reduir el consum energètic des de dos punts de vista: aprofitant recursos ja existents, en ampliar la vida útil d'edificis encara estructuralment funcionals, però en una condicions tèrmiques, de salubritat o equipament deficients; i reduint el consum energètic d'aquests edificis, amb els beneficis que això suposa per al medi ambient, l'economia i el benestar social dels seus usuaris i de l'entorn.

En la present tesi doctoral s'aprofundeix en el comportament energètic i tèrmic de les cobertes enjardinades en rehabilitació, estructurant-se en dos apartats que aborden l'estudi de la reducció del consum energètic i les consideracions constructives per a una correcta execució d'aquests sistemes enjardinats.

En el primer apartat s'analitza la distribució de temperatures i humitats relatives en les diferents capes de models reals a escala de cobertes enjardinades. Les conclusions extretes d'aquestes dades preses mitjançant *data-loggers*, per a la ciutat de València, es comparen amb el funcionament dels mateixos sistemes constructius de coberta, dissenyats i simulats a través de models informàtics. Aquest procés permet estudiar no sols el comportament tèrmic de la coberta, sinó també el seu funcionament energètic i el possible estalvi a aconseguir en diferents hipòtesis de rehabilitació d'un habitatge, considerant també la possible intervenció sobre altres elements de l'envolupant tèrmica.

El mecanisme d'evapotranspiració presenta un paper important en la dissipació de calor de les cobertes enjardinades, per la qual cosa s'aprofundeix en el seu estudi per al cas de cobertes autosuficients, és a dir, sense aportació d'aigua de reg. Aquest sistema de coberta enjardinada pretén respondre a la problemàtica escassetat d'aigua a la qual s'enfronta part del territori espanyol, especialment en la costa mediterrània en la qual se situa la ciutat de València. També s'aprofundeix en la comprensió sobre quines variables climàtiques, d'entre temperatura ambient, radiació solar i precipitacions, són més influents en aquest procés. La relació de l'evapotranspiració amb l'aigua emmagatzemada, en les capes de la coberta disposades a tal fi, queda patent, reduint-se aquest procés a menor disponibilitat d'aigua, especialment en climes com el mediterrani, amb escasses precipitacions i elevada temperatura ambiental i radiació solar. Totes les reflexions obtingudes permeten confirmar les limitacions en les pèrdues de calor per evapotranspiració derivades de l'escassetat d'aigua, la qual cosa comporta la necessitat de buscar possibles solucions que milloren el seu comportament energètic. Cadascuna de les situacions estudiades, conegudes i plantejades les seues febleses i forteses, permet concloure quin és el millor sistema constructiu de coberta enjardinada per al cas de rehabilitació, principal aportació d'aquest treball.

En el segon i últim apartat, es realitza l'estudi constructiu d'una rehabilitació mitjançant el sistema de coberta enjardinada triat prèviament. Això permet detectar i conèixer els problemes i solucions que afrontar per a aconseguir una correcta execució, la qual suposarà millorar l'accessibilitat, manteniment, sostenibilitat i vida útil del sistema enjardinat de coberta. Comprendre el comportament energètic de les cobertes enjardinades, així com les particularitats d'instal·lació i construcció, permet ampliar la seua difusió, aplicació i els beneficis ambientals, socials i econòmics que del seu ús es deriven.





Green roofs are part of the solutions, designs and construction systems of sustainable architecture. The balance between the environmental, social and economic dimensions in order to achieve the maximum well-being and development of our societies influences how to build. The energy renovation of an increasingly aged and deteriorated housing stock allows energy consumption to be reduced from two points of view: taking advantage of already existing resources, by extending the useful life of buildings that are still structurally functional, but in thermal, health or equipment poor conditions; and reducing the energy consumption of these buildings, with the benefits that this implies for the environment, the economy and the social well-being of its users and the surroundings.

This thesis delves into the energy and thermal behaviour of green roofs under renovation, structured into two sections that address the study of energy consumption reduction and construction considerations for proper execution of these vegetated systems.

The first section analyses the distribution of temperatures and relative humidity in the different layers of real-scale models of green roofs. The conclusions drawn from these data taken by data-loggers, for the city of València, are compared with the running of the same roof construction systems, designed and simulated through computer models. This process makes it possible to study not only the thermal behaviour of the roof, but also its energy performance and the possible savings to be achieved in different housing renovation scenarios, also considering the possible intervention on other elements of the thermal envelope.

The evapotranspiration mechanism plays an important role in the heat dissipation of green roofs, so its study is deepened in the case of self-sustaining roofs, that is, without irrigation water supply. This green roof system aims to respond to the problematic water shortage that part of the Spanish territory is facing, especially on the Mediterranean coast where the city of València is located. It also deepens the understanding of which climatic variables, among outdoor temperature, solar radiation and precipitation, are most influential in this process. The relationship of evapotranspiration with stored water, in the roof layers arranged for this purpose, is evident, reducing this process to less water availability, especially in climates such as the Mediterranean, with low precipitation and high outdoor temperature and solar radiation. All the reflections obtained make it possible to confirm the limitations in heat losses due to evapotranspiration derived from water scarcity, which entails the need to look for possible solutions that improve their energetic behaviour. Each of the situations studied, known and raised their weaknesses and strengths, allows us to conclude which is the best green roof construction system for the case of renovation, the main contribution of this work.

In the second and last section, the constructive study of a renovation is carried out using the previously chosen green roof system. This makes it possible to detect and learn about the problems and solutions to be faced in order to achieve correct execution, which will mean improving the accessibility, maintenance, sustainability and useful life of the green roof system. Understanding the energy behaviour of green roofs, as well as the particularities of installation and construction, allows to expand its diffusion, application and the environmental, social and economic benefits derived from its use.





## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1 PRÓLOGO	3
1.2 OBJETIVOS	5
1.3 ESTRUCTURA	6
<b>CUBIERTAS AJARDINADAS. CONTEXTO</b>	<b>7</b>
<b>2 ARQUITECTURA, CIUDAD Y SOSTENIBILIDAD</b>	<b>9</b>
2.1 LA SOSTENIBILIDAD Y LA SOCIEDAD ACTUAL	9
2.2 LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE	14
2.2.1 Conceptos sobre sostenibilidad en la arquitectura	14
2.2.2 ¿Qué es la arquitectura sostenible?	15
2.2.3 Antecedentes: la arquitectura vernácula	18
2.2.4 El diseño sostenible	19
2.3 LA CIUDAD NATURALIZADA	29
2.3.1 La Infraestructura Verde	33
2.4 LA CUBIERTA AJARDINADA	38
2.4.1 Tipos de cubiertas ajardinadas	40
2.4.2 Historia y evolución de la cubierta plana ajardinada	47
2.5 LA CUBIERTA AJARDINADA Y LA SOSTENIBILIDAD	60
2.5.1 Situación actual de las cubiertas planas ajardinadas en el panorama mundial	60
2.5.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	66
2.5.3 Evaluación de edificios sostenibles	70
2.5.4 Las cubiertas planas ajardinadas en España: marco normativo actual	74
<b>3 CARACTERÍSTICAS DE LAS CUBIERTAS AJARDINADAS</b>	<b>79</b>
3.1 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES	79
3.1.1 Beneficios ambientales y microclimáticos	80
3.1.2 Beneficios térmicos y energéticos	95
3.1.3 Particularidades de comportamiento en el clima mediterráneo	111
3.2 CARACTERÍSTICAS SOCIALES	115
3.3 CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS	117
<b>4 DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LAS CUBIERTAS AJARDINADAS</b>	<b>120</b>
4.1 DISEÑO Y PARTICULARIDADES CONSTRUCTIVAS	120
4.1.1 Soporte resistente	121
4.1.2 Formación de pendientes	122
4.1.3 Barrera de vapor	123
4.1.4 Aislamiento térmico	125
4.1.5 Lámina impermeable	132
4.1.6 Lámina antiraíces	133
4.1.7 Capa drenante	134
4.1.8 Lámina filtrante	143
4.1.9 Substrato	144



4.1.10 Capa separadora	152
4.1.11 Vegetación	161
4.1.12 Sistema de riego	168
4.1.13 Sistema de evacuación de agua	169
<b>4.2 CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN</b>	<b>170</b>
4.2.1 Soporte resistente y pendiente	170
4.2.2 Lámina impermeable	172
4.2.3 Capa drenante	174
4.2.4 Substrato	174
4.2.5 Vegetación: sistema de plantación	175
4.2.6 Particularidades de substrato y vegetación en el clima mediterráneo	177
4.2.7 Sistemas de riego y de evacuación de agua	182
4.2.8 Puntos singulares en cubiertas planas ajardinadas	183
4.2.9 Zonas transitables y pavimentadas	191
4.2.10 Zonas no transitables y sin vegetación	194
<b>4.3 MANTENIMIENTO</b>	<b>197</b>
<b>4.4 OTROS EJEMPLOS DE ARQUITECTURA SOSTENIBLE</b>	<b>199</b>
4.4.1 Earthship	199
4.4.2 Materiales PCM	201
4.4.3 Fachadas vegetales	202
<b>4.5 OTROS EJEMPLOS DE CUBIERTAS SOSTENIBLES</b>	<b>206</b>
4.5.1 Cubierta ajardinada con paneles fotovoltaicos	206
4.5.2 Cubierta aljibe	208
4.5.6 <i>Polder roof</i> (cubierta aljibe ajardinada)	210
<b>5 COMPARATIVA DE CUBIERTAS AJARDINADAS</b>	<b>213</b>
5.1 TABLA COMPARATIVA DE CUBIERTAS AJARDINADAS	213
5.2 CATÁLOGO DE CUBIERTAS AJARDINADAS	218
5.2.1 Cubierta ajardinada extensiva	218
5.2.2 Cubierta ajardinada semiintensiva	220
5.2.3 Cubierta ajardinada intensiva	222
5.2.4 Cubierta ajardinada intensiva: huerto	225
5.2.5 Cubierta ajardinada con paneles fotovoltaicos	227
5.2.6 Cubierta aljibe	229
5.2.7 <i>Polder roof</i>	230
<b>CUBIERTAS AJARDINADAS. ESTUDIO TÉRMICO Y ENERGÉTICO</b>	<b>231</b>
<b>6 MONITORIZACIÓN CON SENSORES EN MODELOS A ESCALA</b>	<b>233</b>
6.1 ESTUDIO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA, EL PESO PROPIO Y EL COSTE	233
6.1.1 Elección de modelos	234
6.2 ELECCIÓN DE MATERIALES	239
6.2.1 Lámina impermeable	239
6.2.2 Aislamiento térmico	241
6.2.3 Substrato	244
6.2.4 Vegetación	245
6.2.5 Otras capas	253
6.2.6 Sistema de riego	254
6.3 MONTAJE DE LOS MODELOS	256





6.4 DATA-LOGGERS	261
6.4.1 Elección del sistema	261
6.4.2 Ubicación e instalación	263
6.5 CONTROL DE LA VEGETACIÓN	266
6.5.1 Control fotográfico	266
6.5.2 Consideraciones sobre el estado de la vegetación	268
6.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	270
6.6.1 Datos meteorológicos	270
6.6.2 Datos de temperatura y humedad relativa por maquetas	272
6.6.3 Consideraciones finales	310
<b>7 SIMULACIONES ENERGÉTICAS CON ENERGYPLUS Y OPENSTUDIO</b>	<b>311</b>
7.1 SISTEMAS DE MODELIZACIÓN	311
7.1.1 EnergyPlus	312
7.1.2 Validación del programa	314
7.2 EDIFICIO DE REFERENCIA Y PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN	317
7.2.1 Modelo de referencia	319
7.2.2 Propuestas de rehabilitación	320
7.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	323
7.3.1 Influencia de la cubierta	323
7.3.2 Comportamiento energético de las propuestas de rehabilitación	331
7.3.3 Comportamiento energético de las cubiertas autosuficientes	376
7.3.4 Propuestas de riego para la mejora del comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas	384
<b>CUBIERTAS AJARDINADAS. ESTUDIO CONSTRUCTIVO</b>	<b>391</b>
<b>8 DETALLES CONSTRUCTIVOS</b>	<b>393</b>
8.1 DETALLES CONSTRUCTIVOS DE CUBIERTA PLANA	395
8.1.1 Detalle A. Cubierta no transitable: encuentro con paramento y desagüe lineal	395
8.1.2 Detalle B. Cubierta transitable: acceso a cubierta en zona pavimentada	397
8.1.3 Detalle C. Cubierta transitable: encuentro con paramento, desagüe puntual y transición entre zona ajardinada y pavimentada	399
8.2 DETALLES CONSTRUCTIVOS DE CUBIERTA INCLINADA	402
8.2.1 Detalle D. Cumbrera	402
8.2.2 Detalle E. Alero	402
<b>9 CONCLUSIONES</b>	<b>407</b>
9.1 APORTACIONES	407
9.2 RECOMENDACIONES DE DISEÑO	411
9.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	412
<b>REFERENCIAS</b>	<b>415</b>
R.1 FIGURAS	415
R.2 TABLAS	433
R.3 BIBLIOGRAFÍA	444
<b>ANEXO I. ESTUDIO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA, EL PESO PROPIO Y EL COSTE</b>	<b>469</b>
I.1 DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LOS MODELOS	469
I.2 TRANSMITANCIA TÉRMICA	485



I.3 PESO PROPIO	494
I.4 COSTE DE CONSTRUCCIÓN	503
<b>ANEXO II. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS METEOROLÓGICOS</b>	<b>511</b>
II.1 TEMPERATURA	511
II.2 HUMEDAD RELATIVA	511
II.3 PRECIPITACIONES	511
<b>ANEXO III. PARÁMETROS DE MODELIZACIÓN EN ENERGYPLUS Y OPENSTUDIO</b>	<b>516</b>
III.1 MODELO DE REFERENCIA	516
III.2 PROPUESTA DE REHABILITACIÓN	541
<b>ANEXO IV. GRÁFICAS ORIGINALES DE ENERGYPLUS Y OPENSTUDIO</b>	<b>548</b>
IV.1 GRÁFICAS DEL APARTADO 7.3.2	548
<b>ANEXO V. GLOSARIO DE TÉRMINOS TRADUCIDOS</b>	<b>549</b>

## INTRODUCCIÓN





## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 PRÓLOGO

La actual emergencia climática y sus múltiples consecuencias, como la inestabilidad del coste de la energía, la escasez de recursos y el aumento de las temperaturas, están interrelacionadas con los espacios construidos. La arquitectura y el urbanismo, como disciplinas que se encargan de diseñar y construir el entorno del ser humano, deben encaminarse a minimizar los impactos negativos del cambio climático, así como a tratar de revertir los daños ya causados al medio ambiente.

En este contexto son motores de cambio el aumento de uso de energías renovables, el auge de los certificados de sostenibilidad o el desarrollo de un diseño sostenible en la arquitectura, el cual se encamina a minimizar el consumo energético de los edificios, a lo largo de todo el ciclo de vida útil, así como a fomentar una relación más estrecha entre construcción y entorno. Estrategias pasivas de control solar, el uso de nuevos materiales, la captación y almacenamiento de recursos, como la lluvia, o el uso de superficies vegetales en la envolvente del edificio son algunas de las estrategias de la arquitectura para seguir este camino de cambio y esta corriente sostenible.

Las cubiertas ajardinadas destacan dentro del amplio abanico de herramientas de la arquitectura sostenible por su capacidad de renaturalización de la ciudad y de aportar una serie de beneficios tanto ambientales, como económicos y sociales. Los beneficios ambientales permiten no solo reducir el impacto sobre el medio ambiente de la construcción de edificios y su uso, sino también aumentar la resiliencia a los problemas derivados del cambio climático, como los fenómenos meteorológicos extremos cada vez más frecuentes. Desde un punto de vista energético, su característico comportamiento térmico permite, en mayor o menor medida en función de variables como la disponibilidad de agua, el desarrollo de la vegetación o la intensidad de la radiación solar, reducir la temperatura superficial exterior de la cubierta y la transferencia de calor que se produce hacia el interior. Esto implica una reducción del consumo energético y, por lo tanto, un beneficio ambiental derivado de la disminución en el uso de recursos. Este importante beneficio es más destacable en las cubiertas ajardinadas que en otros sistemas vegetales, como las fachadas, ya que las cubiertas son la parte de la envolvente de un edificio que mayor radiación solar recibe a lo largo del día.

También existen una serie de beneficios económicos y sociales, como el aumento del bienestar y la salud de los usuarios de la ciudad, así como el aumento del sentimiento de colectividad. Todos estos beneficios abarcan desde la pequeña escala de la vivienda, donde son más relevantes los beneficios energéticos, hasta una mediana y gran escala. En este caso a nivel de barrio, ciudad e Infraestructura Verde las cubiertas ajardinadas destacan desde un punto de vista de mejora del medio ambiente, de aumento del valor económico de los espacios y de mejora del estado y salud de los ciudadanos. En esta tesis, se va a profundizar en el conocimiento del comportamiento térmico y energético de las cubiertas ajardinadas, abarcando la pequeña escala de la vivienda y su influencia en ella. Se plantearán más adelante posibles futuros caminos dirigidos a estudiar las cubiertas ajardinadas en la mediana y gran escala.

Hasta llegar a la situación actual, cabe conocer de donde surgieron las cubiertas y como han ido evolucionando hasta la actualidad. El inicio de su desarrollo conceptual a mediados del siglo XX en el centro de Europa ya se produjo de la mano de una crisis energética. El estudio de sus propiedades y características ha sido paulatino desde entonces, con un aumento de su importancia y aplicación a partir de las décadas de 1980-1990. Hasta la actualidad, en un contexto energético y climático de constante cambio y degradación, las diferentes investigaciones han ido encaminadas a profundizar, especialmente, en los beneficios ambientales y en el ahorro energético que puede suponer la instalación de este tipo de cubiertas.

El hecho de que se iniciara su desarrollo en el centro de Europa ha fomentado que las investigaciones llevadas a cabo se hayan centrado, históricamente, en estos territorios. Las condiciones climáticas son claramente influyentes en el comportamiento de las cubiertas ajardinadas, por lo que, en los últimos años se ha



visto como necesario ampliar el estudio de estas cubiertas a otros tipos de climas. En climas como el mediterráneo hay menor aplicación de las cubiertas ajardinadas, consecuencia de una trayectoria investigadora más corta entorno al comportamiento de las cubiertas con acabado vegetal en un entorno climático con pocas precipitaciones, cálido y con intensa radiación solar casi todo el año. Por lo tanto, en esta tesis se profundiza en la relación entre el comportamiento térmico de las cubiertas ajardinadas y su limitada disposición de agua, al ubicarse en un clima caluroso y con pocas precipitaciones anuales.

También cabe destacar la amplia existencia de investigaciones que analizan la contribución térmica y energética de las cubiertas ajardinadas en el campo de la rehabilitación. En la actualidad, este entorno de estudio es todavía más significativo, debido al papel importante que tiene la arquitectura en la carrera sostenible en la que se encuentra inmersa nuestra sociedad, poniendo en el centro de mira los edificios y como se vive en ellos. La rehabilitación energética de viviendas para reducir su consumo, la introducción de nuevas soluciones arquitectónicas sostenibles o el uso de energías renovables está a la orden del día en gran parte de los países desarrollados. De acuerdo con este escenario actual, en la tesis se plantea el estudio de las cubiertas ajardinadas en un clima mediterráneo, centrado en el campo de la rehabilitación.

Al considerarse las particularidades del clima mediterráneo de la ciudad de Valencia, se plantea en la tesis la problemática de la escasez de agua en las cubiertas ajardinadas autosuficientes, es decir, sin sistema de riego. En este caso es necesario profundizar en el estudio del funcionamiento térmico y energético cuando la disponibilidad de agua es menor y, por lo tanto, puedan existir problemas como la reducción de los fenómenos de disipación de calor propios de las cubiertas con acabado vegetal o el aumento de la mortalidad de la vegetación. De esta forma, se pretende comprender mejor los mecanismos de enfriamiento, su limitación en función de las condiciones climáticas, y el comportamiento térmico y energético derivado de ello.

Las diferentes experiencias llevadas a cabo en la tesis van encaminadas a conocer mejor los sistemas de cubierta ajardinada para fomentar su empleo en el campo de la rehabilitación. Se estudia, por una parte, la influencia de las condiciones climáticas, específicamente para el caso del clima mediterráneo en territorios con problemas de escasez de agua. Por otro lado, también se determina la influencia en el consumo energético de un edificio tras rehabilitar total o parcialmente la envolvente térmica, instalando una cubierta ajardinada. El conocimiento de cuáles son las variables más influyentes en el comportamiento energético del edificio, así como conocer los valores de peso propio o coste de construcción de los sistemas constructivos de cubierta a instalar, permitirá determinar cuáles son las estrategias constructivas de rehabilitación más adecuadas.

De la mano de estas investigaciones, también se lleva a cabo en la tesis un estudio constructivo detallado de este tipo de sistemas. Es necesario que la construcción de las cubiertas ajardinadas se proyecte junto con el resto de los estudios energéticos, económicos, estructurales, etc. De un buen diseño dependerá su correcto funcionamiento y el aumento de sus beneficios. Además, el mayor conocimiento de las capas del sistema, materiales, correcta colocación y otras cuestiones constructivas mejorará el funcionamiento de la cubierta durante su vida útil, además de reducir el mantenimiento. La rehabilitación de un edificio siempre plantea ciertas dificultades relacionadas con la convivencia entre lo existente y lo nuevo, por lo que es necesario conocer las necesidades constructivas de las cubiertas ajardinadas y como se van a resolver en diálogo con las preexistencias del edificio.



## 1.2 OBJETIVOS

Las cubiertas ajardinadas se utilizan, a lo largo de esta tesis doctoral, como hilo conductor para reflexionar sobre cuestiones relacionadas con la sostenibilidad, la renaturalización de las ciudades y los beneficios que su instalación puede conllevar desde una perspectiva social, económica y ambiental. Su importante papel como herramienta de la arquitectura sostenible y su influencia en la reducción del consumo energético, especialmente en el campo de la rehabilitación, configuran el punto de partida de una investigación detallada de diferentes variables, con el fin de determinar qué sistema de cubierta ajardinada será el óptimo para este campo de aplicación, en el clima mediterráneo. Para ello, será necesario estudiar el comportamiento energético y térmico de las cubiertas ajardinadas autosuficientes, especialmente centrándose en el principal mecanismo de enfriamiento de la cubierta (evapotranspiración) cuando existen limitaciones de humedad debido a las escasas precipitaciones. De estas palabras se extrae que la evapotranspiración también mantiene una relación estrecha con las condiciones climáticas del entorno, resultando de gran importancia determinar cuáles serán más influyentes en las pérdidas de calor producidas. Por último, el empleo de cubiertas ajardinadas en el campo de la rehabilitación ha implicado la realización de un análisis completo, con aspectos energéticos, estructurales o económicos, pero también ha sido necesario comprender el sistema constructivo, su ejecución y resolución de puntos singulares.

A modo de resumen, se detallan a continuación los objetivos principales de la investigación, previamente descritos, por orden de importancia:

- Determinar el sistema de cubierta ajardinada óptimo para su uso en el campo de la rehabilitación en el clima mediterráneo.
- Analizar y conocer con mayor detalle el mecanismo de evapotranspiración en cubiertas ajardinadas autosuficientes.
- Conocer las principales variables climáticas que influyen en las pérdidas de calor por evapotranspiración.
- Solucionar constructivamente la instalación de una cubierta ajardinada en un edificio ya existente.
- Relacionar el uso de cubiertas ajardinadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Para alcanzar estos propósitos se han establecido también una serie de objetivos secundarios:

- Determinar las variables más influyentes a la hora de valorar las cubiertas ajardinadas como soluciones constructivas de rehabilitación. Estas variables supondrán una base de trabajo para determinar el **sistema de cubierta ajardinada óptimo** en el campo de la rehabilitación.
- Conocer el funcionamiento de programas informáticos de análisis energéticos aceptados por la normativa española en vigor, ampliando las herramientas disponibles para estudiar de forma detallada el **comportamiento térmico y energético de las cubiertas ajardinadas**.
- Conocer el comportamiento térmico y energético real de las cubiertas ajardinadas autosuficientes en el clima mediterráneo. Combinado con el empleo de modelos informáticos permite profundizar en el **funcionamiento del mecanismo de evapotranspiración** en sí mismo.
- Analizar, desde un punto de vista económico, la reducción del consumo de energía y la viabilidad de las cubiertas ajardinadas. Las conclusiones obtenidas permitirán ampliar la información disponible por los profesionales del sector para valorar la **viabilidad de las cubiertas ajardinadas** en diferentes casos de **rehabilitación**.
- Determinar las variables constructivas y de entorno que juegan un papel importante en la demanda energética de una vivienda. Se amplía así la información disponible en relación con el **potencial de ahorro energético al rehabilitar** una vivienda, es decir, la posible reducción en su consumo de energía.

A lo largo del desarrollo de la tesis han ido surgiendo otros objetivos intermedios, como, por ejemplo, la comparativa del comportamiento de cubiertas ajardinadas autosuficientes en diferentes climas, el estudio del consumo de energía primaria con la intención de cumplir con los requisitos de la normativa vigente o la influencia en el comportamiento térmico y energético de la introducción de un sistema de riego.



### 1.3 ESTRUCTURA

Con el fin de organizar toda la información e investigaciones llevadas a cabo se ha estructurado la tesis en tres apartados, los cuales incluyen uno o varios capítulos. Además, se han añadido al final cuatro anexos en los que se desarrolla más en detalle aspectos como la elección de los materiales de las maquetas, los datos de entrada empleados para las simulaciones energéticas o el análisis estadístico de los datos meteorológicos empleados.

#### ***Cubiertas ajardinadas. Contexto.***

Este apartado se compone de cinco capítulos en los que se recoge toda la información necesaria para comprender el comportamiento de las cubiertas ajardinadas como herramientas sostenibles y su aplicación constructiva. El capítulo dos recoge información general sobre la sostenibilidad, la arquitectura y el diseño sostenible, así como la necesidad de renaturalizar las ciudades. Se introducen los primeros conceptos generales sobre las cubiertas ajardinadas: tipologías, historia y tratamiento actual. En el capítulo tres se desarrollan las características ambientales, sociales y económicas de este tipo de cubiertas con acabado vegetal, así como los beneficios derivados de ellas. Se detallan también los principales mecanismos de transmisión de calor y su influencia en el comportamiento térmico y energético de estas cubiertas. En el capítulo cuatro se realiza una basta investigación del sistema constructivo de cubierta ajardinada, con características de cada un de las capas que lo componen, y consideraciones para una correcta ejecución y mantenimiento. Asimismo, se mencionan también otras herramientas de la arquitectura sostenible, así como otros sistemas sostenibles de cubiertas, ya que varias de estas soluciones trabajan bien en conjunto con las cubiertas ajardinadas. Por último, el capítulo cinco se plantea como un compendio de las principales características y soluciones constructivas de las cubiertas mencionadas hasta el momento.

#### ***Cubiertas ajardinadas. Estudio térmico y energético.***

Este apartado engloba la investigación llevada a cabo mediante maquetas de cubiertas monitorizadas con data-loggers durante un año en la UPV (capítulo seis) y el estudio energético realizado mediante simulaciones energéticas valorando la rehabilitación de una vivienda unifamiliar/bloque de viviendas (capítulo siete). En el caso del capítulo seis se recoge la elección de los modelos de cubierta, la ejecución de las maquetas, así como la elección de los materiales. Se incluye también el tratamiento de los datos recogidos durante un año de monitorización, los resultados obtenidos y las discusiones al respecto. En el capítulo siete se realiza el estudio energético de diferentes hipótesis de rehabilitación con cubiertas ajardinadas autosuficientes. Se plantean cuatro fases de investigación. En primer lugar, el análisis de la influencia de la mejora térmica de la cubierta en el ahorro energético conseguido en rehabilitación, en función de las condiciones climáticas del entorno. De acuerdo con las conclusiones obtenidas, se estudia en la segunda fase el comportamiento energético de las diferentes hipótesis de rehabilitación planteadas en la ciudad de Valencia (clima mediterráneo). Al tratarse de cubiertas autosuficientes, se dedica una tercera fase a la mejor comprensión del comportamiento térmico de este tipo de cubiertas, analizando que variables climáticas tiene mayor influencia. Por último, en la cuarta y última fase se aborda la problemática de buscar un equilibrio entre aporte de agua y mejora del comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas.

#### ***Cubiertas ajardinadas. Estudio constructivo.***

En este apartado, compuesto por el capítulo ocho, se recoge la adaptación de un edificio existente mediante la introducción de cubiertas ajardinadas, tanto planas (transitable y no transitable) como inclinadas. Se trata de solucionar, mediante detalles constructivos, puntos singulares o cuestiones constructivas complejas, abarcando posibles problemas que puedan surgir al adaptar un edificio ya construido para la introducción de una cubierta ajardinada.



**CUBIERTAS AJARDINADAS**

**CONTEXTO**





## 2. ARQUITECTURA, CIUDAD Y SOSTENIBILIDAD

La mutación de la relación naturaleza-humanos ha alimentado y dirigido conjuntamente el avance cultural.  
Jim, C.Y. 2017.

Toda arquitectura refleja la aplicación de la imaginación del hombre para satisfacer sus necesidades.  
Neila, F.J., Frutos, C.B., Britto, C. 2004.

### 2.1 LA SOSTENIBILIDAD Y LA SOCIEDAD ACTUAL

Como bien dijo Aristóteles, el ser humano es un ser social por naturaleza. La interacción, la convivencia y la búsqueda de la individualidad determinan el comportamiento de cada individuo en un contexto colectivo. El desarrollo de las nuevas tecnologías y la globalización han abierto y planteado un escenario todavía más amplio en el que desarrollarnos como seres sociales. Hoy en día se puede estar en cualquier lugar del mundo en cualquier momento, recorriendo miles de kilómetros en un simple click. Pero esta visión tan amplia no debe cegar frente al entorno más cercano, el escenario físico, y no virtual, donde se desarrolla la cotidianidad de la vida.

En la actualidad, del orden de 3500 millones de personas (valor que representa en torno al 55 % de la humanidad<sup>1</sup>) vive en conurbaciones, ciudades o megalópolis, y se prevé que esa cifra aumente, aproximadamente, hasta los 5000 millones para el 2030<sup>2</sup>. Este valor aumenta en Europa, donde el porcentaje asciende a valores cercanos al 74 %<sup>3</sup>. Eso quiere decir que, en los próximos diez años, más de la mitad de la población humana desarrollará su día a día en un entorno urbano, andando por sus calles, disfrutando sus espacios y respirando su aire.

Pero, ¿cómo son los espacios y el aire de nuestras ciudades? ¿Cómo son, en general, estas ciudades? Según datos de la OMS (Organización Mundial de la Salud), desde 2016 el 90 % de los habitantes de las ciudades respira aire que no cumple con las normas de seguridad establecidas<sup>4</sup>, lo que implica que en los lugares en los que viven, trabajan, descansan, hacen deporte, etc., la contaminación del aire llega a ser 2,5 veces superior al valor estándar de seguridad<sup>5</sup>. Y esto es solo un ejemplo de lo poco que se cuida el entorno en el que se tiende a vivir. Las preocupaciones por el desarrollo técnico y el avance industrial (iniciados con la conocida Revolución Industrial), así como por la economía, la sociedad del bienestar y la democracia (posteriores a la Segunda Guerra Mundial, o en el caso de España, posteriores al periodo de dictadura), o por los avances científicos y tecnológicos, entre otros, han ido siempre por delante de la preocupación por el medio ambiente. Han definido la hoja de ruta de una humanidad cada vez más global, más conectada, más social y más longeva, pero que se encuentra en un planeta cada vez más desgastado, desequilibrado y enfermo. La sociedad se ha desarrollado ¿pero a qué precio? Mientras actualmente se emplean sistemas de climatización más silenciosos y de diseño más estético para conseguir una temperatura ideal en el interior de las viviendas, la temperatura media del planeta ha ascendido. Si se estudia el caso concreto de la ciudad de València (España), la figura 2.1 muestra como la temperatura máxima media ha aumentado en los últimos 83 años (entre 1938-2021) en 1,5 °C, mientras que la temperatura mínima media ha aumentado todavía de manera más alarmante, alrededor de 3 °C<sup>6</sup>.

1 Lesjak, V., Pajek, L., Košir, M. 2020.

2 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

3 Lesjak, V., Pajek, L., Košir, M. 2020.

4 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

5 Ibídem.

6 Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). 2022.

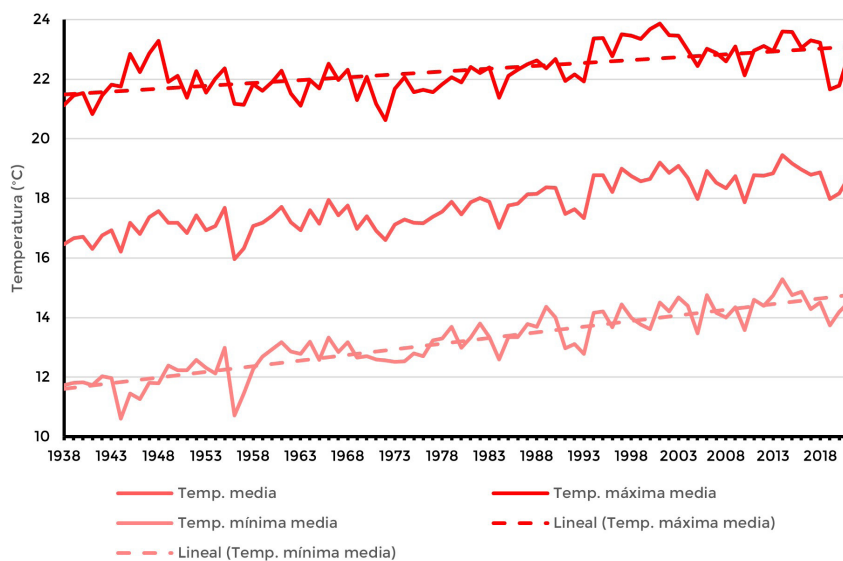


Figura 2.1. Temperaturas máximas y mínimas (°C) en València (España), datos entre 1938-2021.

Quizá entonces, recordando las palabras de Aristóteles, el problema es la falta de reconocimiento de lo que implica ser un ser social, el dónde y el cuándo de esta socialización. La conformación de las primeras ciudades en Sumeria (Mesopotamia) implicó también la organización de un estado en base a un poder religioso y militar. Las personas que vivían en una misma ciudad configuraban entre ellas un contrato social, donde se determinaban las relaciones de poder entre ellas, con la intención de aumentar su bienestar económico<sup>7</sup>. Esta relación de los ámbitos sociales y económicos, que sigue ocurriendo en la actualidad, trata de conseguir el mayor bienestar y beneficio de la sociedad<sup>8</sup>, pero cada vez resulta más obvio que todo esto ocurre en un contexto físico que hemos olvidado, la biosfera<sup>9</sup>. Hoy en día, la ralentización del aumento del bienestar y los beneficios económicos pone de manifiesto el que conforma el tercer pilar de la sostenibilidad y el gran olvidado: el pilar ambiental. Sin él, el equilibrio entre sociedad humana y planeta Tierra es imposible. Por lo tanto, se puede decir que dicho equilibrio, también llamado **sostenibilidad**, se estructura alrededor de tres ejes: económico, social y ambiental<sup>10</sup>.

Este accidental olvido de la realidad tridimensional de la sostenibilidad se puede observar de manera muy clara en el hecho de que no existe ninguna organización a nivel mundial, estatal o comunitaria que se preocupe por los tres aspectos a la vez<sup>11</sup>. Por ejemplo, el *United Nations Environment Programme* (UNEP) o las ONGs ambientales se centran en el pilar ambiental, mientras que la *World Trade Organization* (WTO) o la *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD) se centran en el pilar económico. La crisis económica y social ocurrida en 2008 todavía fomentó más esta ceguera ambiental, ya que los países pospusieron las decisiones en este campo y recortaron esfuerzos y fondos, centrándose en reforzar los pilares económicos y sociales<sup>12</sup>.

Seguramente a propósito no se ha calificado la crisis del 2008 como una *crisis económica*, ya que fue, en verdad, una crisis de sostenibilidad. Problemas sociales como la falta de alimentos, las cosechas cada vez más escasas o la falta de agua potable, al igual que problemas económicos como el encarecimiento de la energía y la reducción de recursos naturales, dependen de problemas ambientales como el aumento de las temperaturas globales del planeta, los deshielos o las escasas precipitaciones, aunque no se trate de una relación obvia a simple vista. El origen del problema es, de nuevo, el planeta Tierra y el olvido de sus necesidades y características, que acaban dirigiendo la sociedad hacia las desigualdades, la pobreza y el receso

7 Thwink.org Inc. 2014.

8 Ibídem.

9 Ibídem.

10 Ibídem.

11 Ibídem.

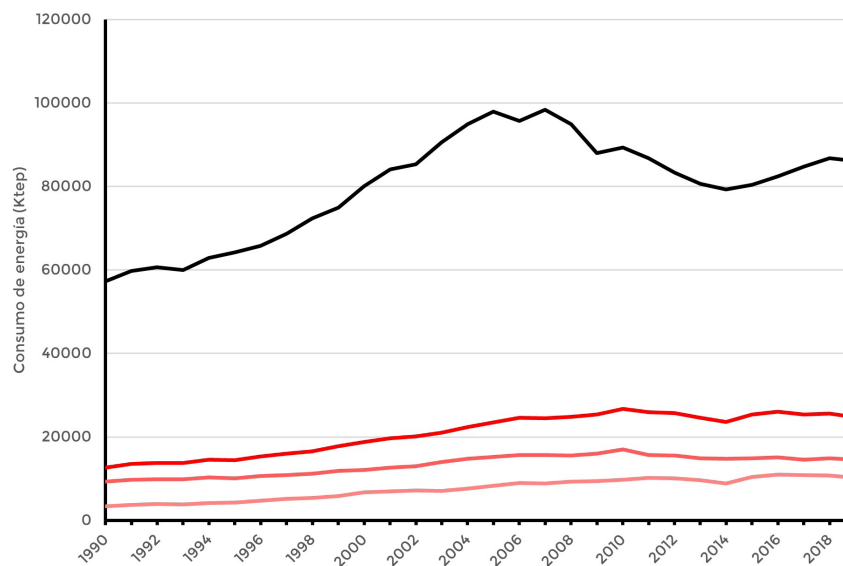
12 Ibídem.



económico. Por lo tanto, el hecho de reforzar dos pilares mientras se le da la espalda a un tercero tan solo provoca que la debilidad del eje ambiental desencadene una nueva caída de todo el sistema del *bienestar* social y económico.

Si se recuerda la pregunta planteada al principio (¿cómo son estas ciudades?), se debería centrar el estudio de la problemática actual en el desequilibrio y desigualdad ambiental y enforzar la pregunta, más bien, hacia el futuro: ¿qué ciudades queremos tener? La existencia de programas como la Agenda 2030<sup>13</sup>, la agenda Europa 2020: una estrategia para el crecimiento inteligente, sostenible e integrador<sup>14</sup> o el programa Natura 2000<sup>15</sup> ponen de manifiesto un interés creciente en el aspecto global de la sostenibilidad. El planeamiento de las ciudades, al igual que los edificios y las infraestructuras que la constituyen, debe adoptar un nuevo y necesario enfoque sostenible. Para ello las Naciones Unidas han propuesto, como principal ejemplo de esta nueva hoja de ruta, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)<sup>16</sup>: 17 objetivos para conseguir un equilibrio económico, social y ambiental desde todos los ámbitos de la sociedad actual.

La arquitectura, como parte fundamental de la sociedad y de la construcción de su entorno físico, tiene un papel muy importante tanto en la actual problemática ambiental, como en la posible solución del problema. Las ciudades que se han diseñado utilizan más del 70 % de la energía consumida por la humanidad<sup>17</sup>. Concretamente, en España, el sector de la edificación supone aproximadamente un 30 % del consumo total de energía, siendo a 2019 (últimos datos disponibles a fecha de consulta) un 17,1 % responsabilidad del sector residencial y el resto de comercios, servicios y administración pública (sector terciario)<sup>18</sup>. De este consumo energético, entre el 10 % y el 50 % se debe a pérdidas de aire por la envolvente del edificio<sup>19</sup>. Este consumo de energía ha ido subiendo paulatinamente desde 1990 y, a pesar del receso sufrido a partir de la crisis de 2008, desde 2014 se aprecia un aumento del consumo de energía (Figura 2.2), aunque respecto al resto de sectores cabe destacar que el aumento del consumo energético del sector de la edificación ha sido moderado (solo un 5,2 % del crecimiento del consumo energético total del conjunto de sectores del país)<sup>20</sup>.



13 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

14 Grupo de trabajo de Conama 2014. 2014.

15 Comisión Europea. 2014.

16 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

17 Britto, C. 2001.

18 Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE). 2019; Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020b.

19 Lerma, C., Barreira, E., Almeida, R.M.S.F. 2018.

20 Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020b.

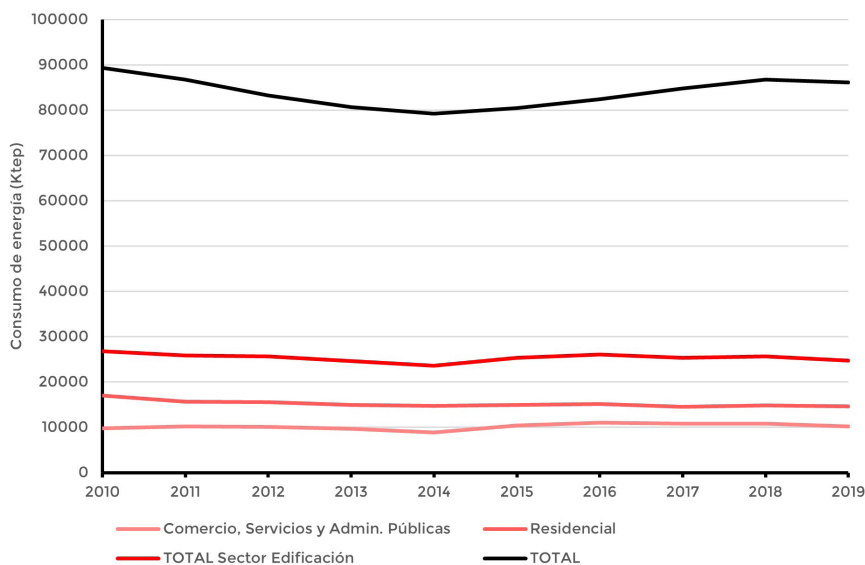


Figura 2.2. Evolución desde 1990 (sup.) y 2010 (inf.) del consumo de energía del total de todos los sectores y del sector de la edificación: residencial, terciario y tota (en miles de toneladas equivalentes de petróleo, Ktep).

La introducción de la sostenibilidad en el desarrollo urbano y el diseño arquitectónico pueden permitirnos un ahorro energético mucho mayor, y, como consecuencia, también una menor contaminación global y una mejora del medio ambiente. Es por ello que, cada vez con mayor ahínco, la normativa española referente para la construcción de edificios, el **Código Técnico de la Edificación (CTE)**, se centra en la consecución del máximo ahorro energético y la orientación hacia el edificio de consumo de energía casi nulo<sup>21</sup>.

Centrándonos en la contaminación, también las ciudades contribuyen en gran medida. Las ciudades emiten aproximadamente un 70 % de las emisiones de efecto invernadero responsable de la actividad humana, especialmente derivadas del suministro de energía y el transporte<sup>22</sup>. Solo la construcción de edificios en la Unión Europea suponía, ya a principios de siglo XXI, el consumo del 40 % de los materiales, la generación del 40 % de los residuos y el consumo del 40 % de la energía primaria<sup>23</sup>. En España, la generación de electricidad y el consumo de combustibles en los sectores residencial, comercial e institucional supusieron, en 2021, un 11,3 % y 8,8 % del total de emisiones de gases de efecto invernadero<sup>24</sup>.

Además, la principal fuente de energía suministrada en España, en 2020 (últimos datos disponibles), respecto al consumo total de energía es el petróleo (40,15 %), mientras que fuentes de energía renovables o verdes como el biofuel o la energía solar y eólica solo representan un 7,32 % y un 7,85 %<sup>25</sup>, respectivamente (Figura 2.3). De hecho, de acuerdo con los datos arrojados por la encuesta de habitabilidad durante la crisis sanitaria de la COVID-19 realizada por el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC), el 90 % de las viviendas de los encuestados en Madrid (España) no dispone de ninguna instalación de energía renovable<sup>26</sup>. Al observar estos datos, todavía parece más necesario reducir el gasto energético, ya que esta energía proviene de fuentes altamente contaminantes. La Unión Europea (EU) se ha propuesto reducir, para 2030, las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40 % y mejorar en un 32,5 % su eficiencia energética<sup>27</sup>, y esto pasa por, de acuerdo con los datos mostrados, el diseño de una arquitectura que sea capaz de reducir el consumo energético de nuestras ciudades y edificios, ya que “la energía más ecológica es aquella que no se consume”<sup>28</sup>

21 Ministerio de Fomento. 2022a.

22 ONU-Habitat. 2020.

23 Nieva, A.B., Del Pozo, A.V.-E. 2005.

24 Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2022a.

25 International Energy Agency. 2022.

26 Vilches, T.C. 2020.

27 Comisión Europea. 2020a.

28 DANOSA España. 2014.

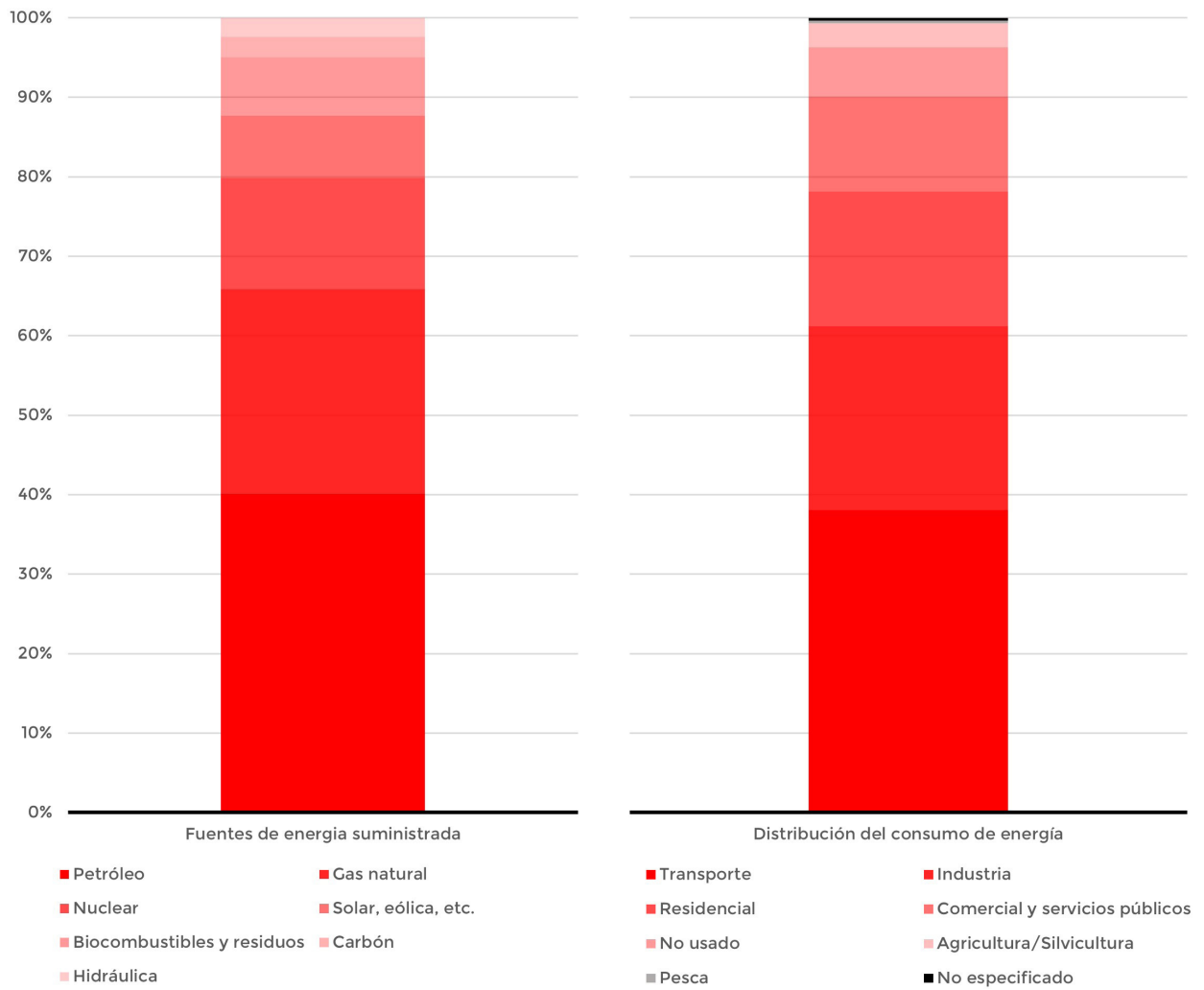


Figura 2.3. Porcentaje de energía suministrada en España por fuente en 2020 (izq.) y distribución del consumo en 2019 (dcha.).



## 2.2 LA ARQUITECTURA SOSTENIBLE

Por lo tanto, la sostenibilidad debe convertirse en la necesaria herramienta que impulse a la sociedad hacia un futuro en el que los avances económicos y sociales sean posibles dentro de un entorno ambiental sano. El ser humano, cada vez más enfocado al ser urbano, debe ser capaz de crecer en un entorno que favorezca su bienestar y su beneficio. Así mismo, será en la arquitectura y el planeamiento urbano donde radicará, en gran parte, la reconducción de la tendencia climática y ambiental actual. En este contexto, debido a la necesidad del ser humano de responder a la problemática derivada del mundo industrial y consumista actual<sup>29</sup>, se configura el concepto de **arquitectura sostenible**, de gran amplitud y que puede abarcar un gran abanico de posibilidades orientadas a alcanzar la eficiencia energética y la equidad ambiental, social y económica.

### 2.2.1 Conceptos sobre sostenibilidad en la arquitectura

Conviene, en primer lugar, definir algunos conceptos relacionados con la arquitectura sostenible:

- **Arquitectura sostenible.** Diseño del edificio no solo en base a las condiciones climáticas del entorno, sino también estableciendo una relación activa con el emplazamiento<sup>30</sup>, asemejándose a cualquier ser vivo, capaz de adaptarse a las condiciones del entorno y adaptar su metabolismo. Los objetivos de la arquitectura sostenible son la consecución de edificios que sean eficientes energéticamente, capaces de disminuir los gases contaminantes expulsados a la atmósfera, que mejoren la calidad de vida y que favorezcan la creación de ciudades más naturales y limpias<sup>31</sup>.
- **Arquitectura integrada.** Diseño cuyo punto de partida es la adaptación del edificio a su entorno físico, socioeconómico y cultural, empleando materiales autóctonos, técnicas y formas tradicionales, favoreciendo la integración visual y reduciendo el impacto ambiental<sup>32</sup>.
- **Arquitectura de alta eficacia energética.** Diseño arquitectónico que busca maximizar el ahorro y la conservación energética mediante la eficacia en la captación, producción y transformación de energía en su propia estructura, reduciendo, por tanto, el consumo energético externo y la contaminación generada<sup>33</sup>.
- **Edificio de consumo de energía casi nulo.** En la sección HE 0, del *Documento Básico de Ahorro de Energía* (DB-HE) del CTE, se define como el “edificio que cumple con las exigencias reglamentarias establecidas para edificios de nueva construcción en las diferentes secciones del DB-HE”<sup>34</sup>. Se trata de maximizar la producción, almacenamiento y uso de la energía en el propio edificio, sin aportaciones exteriores, mediante fuentes de energía renovables; al mismo tiempo que se trata de reducir la energía asociada a materiales y transporte, tanto durante la construcción como durante la vida útil del edificio.
- **Energía sostenible.** Energía obtenida a partir de fuentes cuya cantidad de contaminación generada no es elevada como para prohibir su uso, además de no añadir carbono a la atmósfera<sup>35</sup>.
- **Energía verde.** Energía que puede ser extraída, producida o consumida sin impacto en el medio ambiente<sup>36</sup>.
- **Infraestructura Verde.** Se define por la Comisión Europea como una “red estratégicamente planificada de espacios de alto valor natural y áreas seminaturales junto con otros elementos ambientales, diseñados y gestionados para aportar un amplio rango de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad en asentamientos rurales y urbanos”<sup>37</sup>. Dentro del ámbito de las ciudades, se entiende como una red verde compuesta por jardines, huertos urbanos, paseos arbolados y cubiertas, patios y fachadas o mu-

29 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

30 *Ibidem*.

31 Cruz, A.I. 2017.

32 Britto, C. 2001.

33 *Ibidem*.

34 Ministerio de Fomento. 2022a.

35 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

36 *Ibidem*.

37 Comisión Europea. 2014.





ros verdes; y que trata de integrar los procesos naturales en la planificación territorial y fomentar la renaturalización de las ciudades<sup>38</sup>. La Infraestructura Verde es, básicamente, una herramienta para gestionar el capital natural de que disponemos, incluido en las ciudades, de forma inteligente e integrada<sup>39</sup>.

- **Arquitectura verde.** Diseño y pensamiento arquitectónico que sigue propósitos sostenibles, esto es ambientales, climáticos, sociales y económicos<sup>40</sup>. Actualmente, al hablar de arquitectura verde, se habla de diferentes sistemas o elementos, como pueden ser las cubiertas verdes, fachadas o muros verdes, el uso integrado en el edificio de turbinas de viento o placas solares, entre otros. Las principales estrategias de la arquitectura verde, de acuerdo con Mohammadi y Sobouti<sup>41</sup>, son:
  - Uso de energía natural en el consumo diario.
  - Estabilidad en las condiciones higrotérmicas interiores.
  - Uso del agua de lluvia o las aguas grises para el riego de espacios verdes.
  - Uso de métodos apropiados para reducir los desperdicios y optimizar el consumo de energía.
  - Atender a las condiciones climáticas del entorno.
  - Evitar daños sobre el entorno natural.
  - Alcanzar la máxima calidad de vida estableciendo una relación directa con el entorno.
  - Preocupación por la ecología de la región.
  - Uso de materiales reciclables no-químicos y materiales que no dañen la salud humana.
  - Diseño en base a materiales cercanos.
  - Uso de plantas para inspirar un diseño vivo.
- **Cubierta ajardinada.** Sistema constructivo de cubierta compuesta en su totalidad, o en parte, por un sistema de capas que incluyen vegetación y sustrato. Este término también se puede aplicar a cubiertas con paneles solares, con o sin vegetación, o cubiertas aljibe ya que cumplen los requisitos de la arquitectura verde<sup>42</sup>. En ámbitos urbanos, esta cubierta proporciona una serie de beneficios climáticos, energéticos, sociales y económicos.

### 2.2.2 ¿Qué es la arquitectura sostenible?

La arquitectura sostenible es la integración de factores ecológicos, sociales, culturales y económicos<sup>43</sup>. Las intenciones principales de la arquitectura sostenible son la protección de hábitats naturales, la contribución al control de aguas de tormenta y la conservación de los recursos hídricos<sup>44</sup>, entre otras, mediante un diseño sostenible, el uso de materiales *eco-friendly*, el empleo de herramientas y técnicas sostenibles o la aplicación de normativas que están del lado de la eficiencia energética<sup>45</sup>.

Pero, tras los principales reclamos de la **arquitectura sostenible**, hay todo un trasfondo que incluye un cambio de mentalidad por parte de la sociedad actual, siendo necesario no solo un cambio en la industria de la arquitectura, sino también un conocimiento y una aceptación por parte de los usuarios. La arquitectura sostenible nació a partir de la necesidad de reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, de acuerdo con los objetivos firmados durante la Cumbre del Clima 2015 (París, Francia), pero, a partir de ese surgimiento, ha ido mostrando una gran amplitud de espectro, convirtiéndose en el principal motor de desarrollo y consecución de la ciudad sostenible que se pretende alcanzar<sup>46</sup>.

38 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

39 Comisión Europea. 2014.

40 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

41 *Ibíd.*

42 *Ibíd.*

43 Telichenko, V., Benuzh, A., Mochalov, I. 2017.

44 *Ibíd.*

45 Liu, K.S., Liao, Y.T., Hsueh, S.L. 2017.

46 *Ibíd.*



Es así como la arquitectura sostenible tiene ahora la responsabilidad de conseguir que el ser social sea consciente de su entorno, fomentando acciones que favorezcan por igual a los tres pilares de la sostenibilidad: ambiental (no poniendo en riesgo los recursos naturales de las generaciones futuras<sup>47</sup>), económico (aumentando la competitividad industrial y fomentando las oportunidades empresariales de innovación<sup>48</sup>) y social (mejorando la calidad de vida y fomentando la solidaridad). Algunas de las acciones que estructuran el funcionamiento de la arquitectura sostenible y que permiten conseguir abarcar estos tres ejes son: el empleo de materiales cercanos que impliquen el mínimo gasto energético de transporte y producción; la adaptación de los espacios construidos a las condiciones climáticas para conseguir condiciones adecuadas de confort con el mínimo gasto de recursos naturales o energéticos; el empleo de métodos estandarizados para conseguir el mínimo gasto y desperdicio de energía<sup>49</sup>, etc.

La educación de los usuarios en la nueva concepción sostenible es necesaria, ya que, sin un cambio en las prioridades de los usuarios, no puede existir un cambio en el objetivo de la arquitectura<sup>50</sup>. La nueva conciencia ecológica debe considerar en el diseño la coexistencia de la naturaleza con la ciudad y la creación de un sistema de edificios sostenibles, pero para ello es necesario superar los tabús existentes. Uno de los más restrictivos es la creencia de que la arquitectura sostenible es incapaz de alcanzar objetivos relacionados con la estética, la economía o la sociología. La realidad es que este tipo de proyectos no solo responden a las exigencias del clima y las particularidades del lugar, sino que también son capaces de crear un entorno más variable y estimulante estética, economía y socialmente<sup>51</sup>.

En Alicante (España), un concurso público convocado por el ayuntamiento evidenció, en 2009, este necesario cambio de mentalidad. La idea municipal de una Vía Parque que rodeaba la ciudad como un cinturón verde se había perdido poco a poco bajo la presión urbanística y de los automóviles. La falta de conciencia sostenible había convertido este elemento potencial de la Infraestructura Verde de la ciudad en un espacio ocupado por coches y en suelo edificable. El proyecto del Observatorio del Medio Ambiente Urbano, del grupo Aranea, trató de revertir con su diseño esa problemática, construyendo un edificio que pretendía devolver la sostenibilidad a la Vía Parque, aunque solo fuera puntualmente. El edificio configura un entorno natural con su propia forma e implantación, planteando una ocupación puntual y usos variables del espacio. La vegetación, en cambio, forma parte constante y permanente de la construcción, al igual que el patio central y la cubierta ajardinada que le devuelven a la Vía Parque el espacio que las infraestructuras del edificio le pudieran haber quitado (Figuras 2.4 y 2.5). Y todo ello configura, además, un espacio tranquilo, aislado de la circulación de vehículos que le rodea y estéticamente agradable<sup>52</sup>.



Figura 2.4. Vista de la cubierta ajardinada del Observatorio del Medio Ambiente Urbano, Alicante (España).

47 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

48 Liu, K.S., Liao, Y.T., Hsueh, S.L. 2017.

49 Liu, K.S., Liao, Y.T., Hsueh, S.L. 2017; Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

50 Krzemińska, A., Zaręba, A., Dzikowska, A. 2017.

51 Neila, F.J., Frutos, C.B., Britto, C. 2004.

52 Grupo Aranea, Cervera, J.C. 2018.



Figura 2.5. Vista lateral, la vegetación dialoga con el Observatorio del Medio Ambiente Urbano, Alicante (España).

El cambio climático es una realidad. En palabras del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), “el calentamiento global es inequívoco, como ponen de manifiesto el aumento observado en las temperaturas medias globales de la atmósfera y de los océanos, el deshielo creciente y el ascenso del nivel medio de los océanos”<sup>53</sup>. Es necesario, por lo tanto, que se apliquen medidas globales urgentes capaces de limitar sus efectos, empleando todas las herramientas posibles y difundiendo la máxima información al respecto para concienciar a la sociedad. La arquitectura se muestra en este momento como la clave de esta conexión sociedad-emergencia climática. El derecho a una vivienda digna, las necesarias infraestructuras de la sociedad del bienestar, el desarrollo, la innovación y los avances científicos hacen de la arquitectura un bien de primera necesidad. Si de ella se hace una carta en defensa de la sostenibilidad será posible reconducir la situación actual. Es necesario conectar la arquitectura con el cambio climático, con las olas de calor cada vez más frecuentes, intensas y duraderas; con la reducción de las superficies cubiertas de hielo; con las pérdidas de biodiversidad; con la menor disponibilidad de agua potable para el consumo humano, la agricultura y la generación eléctrica<sup>54</sup>. Es necesario recordar que la principal causa del cambio climático es el aumento de la presencia de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, debido a diferentes factores, como por ejemplo la deforestación, los cambios de uso del suelo y la quema de combustibles fósiles<sup>55</sup>. Esos mismos que empleamos para generar electricidad, que, a su vez, necesitamos para activar los sistemas de climatización, cada vez más necesarios debido a que los GEI actúan como bloqueadores térmicos, absorbiendo calor, impidiendo que salga de la atmósfera y devolviendo a la superficie terrestre cada día una mayor cantidad de radiación que aumenta la temperatura del planeta<sup>56</sup>. Esta relación, como tantas otras, es necesaria para comprender el verdadero trasfondo de la arquitectura sostenible.

Una vez ya se ha hecho hincapié en la importancia de la educación y la difusión de la arquitectura sostenible, cabe centrarse en sus particularidades de diseño y planificación. En la primera definición del término de sostenibilidad, en el informe Brundtland (1987)<sup>57</sup>, se enfatizaba el concepto de *sitio*, y para que este pudiera ser sostenible debía tener un “diseño, construcción, operaciones y mantenimiento que se ajuste a las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para desarrollar sus propias necesidades” (trad. a). Por lo tanto, la arquitectura y el diseño de espacios se encuentra en la definición primera del concepto de sostenibilidad, debiendo ser capaces de desarrollar nuevas estrategias climático-arquitectónicas para acondicionar espacios y aportar unas condiciones físicas y psíquicas aptas para el desarrollo de las actividades humanas que, siguiendo el estudio realizado por Britto<sup>58</sup>, giran en torno al acondicionamiento térmico, acústico, lumínico, visual, funcional y sanitario.

53 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

54 *Ibidem*.

55 *Ibidem*.

56 *Ibidem*.

57 Telichenko, V., Benuzh, A., Mochalov, I. 2017.

58 Britto, C. 2001.



Este acondicionamiento de las edificaciones se debe conseguir mediante medios naturales y pasivos que permitan reducir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por la construcción, el uso y el mantenimiento del edificio a lo largo de su vida útil<sup>59</sup>. Flores-Larsen y Filippín<sup>60</sup>, en su estudio sobre la mejora de las condiciones interiores de viviendas de bajo coste e ineficiencia energética en un barrio de La Pampa (Argentina), determinaron que la introducción de elementos de control pasivos de la radiación incidente sobre la envolvente (como la vegetación o fachadas ventiladas) y la ventilación natural durante la noche conseguían descender hasta 3 °C de media la temperatura interior durante olas de calor época cálida. También determinaron que estas actuaciones podían llegar a reducir un 37 % la carga de los equipos de refrigeración respecto al modelo sin control pasivo de ningún tipo, aunque determinaron que en estos casos para alcanzar en el interior el confort térmico sería necesario el uso de equipos de climatización, hecho que quizá si estas viviendas se hubieran pensado desde un principio como un proyecto sostenible podría haberse evitado.

Es necesario, por lo tanto, definir una serie de nuevas estrategias como la concepción de un ecosistema del ambiente residencial, el ahorro energético pasivo y activo diario o el tratamiento de residuos sólidos y agua<sup>61</sup>, y no enfocarse exclusivamente en añadir elementos a edificios sin un espíritu sostenible, como por ejemplo simplemente incorporar más aislamiento a la envolvente o colocar paneles solares en la cubierta<sup>62</sup>. Resulta evidente que un proyecto será capaz de profundizar más en todos los aspectos que conforman la estructura interna de la arquitectura sostenible si es capaz de ser integrador y orgánico, no quedándose solo en la simplicidad de lo aditivo, permaneciendo en la mera superficie del verdadero funcionamiento de la arquitectura sostenible.

### **2.2.3 Antecedentes: la arquitectura vernácula**

Los datos muestran cómo la problemática global del cambio climático representa una curva exponencial, mostrándose en los últimos años como un problema mucho más grande y de mayor relevancia de lo que jamás había sido. La temperatura media global asciende, año a año, a mayor velocidad. La calidad del aire empeora de manera progresiva y evidente. La severidad de los fenómenos atmosféricos aumenta cada vez conllevando más muertes y costes económicos. Esto nos lleva a preguntarnos cómo se ha llegado hasta esta situación. No solo la Revolución Industrial, con su aumento en el uso de combustibles fósiles<sup>63</sup>, ha provocado este aumento cada vez más pronunciado de los efectos del cambio climático. En el campo de la arquitectura, en el mundo globalizado y avanzado actual, se ha olvidado la construcción que interactúa con el clima, imponiéndose la construcción contra el clima.

Pero esto no ha sido así siempre. La arquitectura vernácula se caracterizaba por mostrar claras diferencias en su composición, diseño y ejecución en función de la ubicación geográfica, producto de las variaciones culturales de cada lugar, todo englobado bajo las diferencias climáticas existentes. En la antigüedad, la limitación de recursos naturales, y la casi imposibilidad de importarlos de otras localizaciones, conllevó que el ser humano construyera viviendas con los recursos que disponía<sup>64</sup>. La producción de los materiales de construcción implicaba un mínimo gasto de energía, al igual que se minimizaba el consumo energético en el transporte de estos hasta el emplazamiento en cuestión. Al mismo tiempo, los escasos avances tecnológicos les obligaban a emplear recursos pasivos para aprovechar el frío o el calor y para protegerse de las cargas externas del ambiente. Por ejemplo, en los climas cálidos y templados, frente a la falta de sistemas de climatización artificiales se empleaban voladizos, toldos, marquesinas, etc., para impedir la entrada del sol, o la ventilación cruzada para reducir la temperatura interior de las estancias mediante la circulación del aire. Otro ejemplo se puede observar en las ciudades diseñadas en cuadrícula para conseguir un mayor aprovechamiento de la radiación solar incidente al aumentar con esta disposición geométrica las fachadas

59 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

60 Flores-Larsen, S., Filippín, C. 2021.

61 Liu, K.S., Liao, Y.T., Hsueh, S.L. 2017.

62 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

63 *Ibíd.*

64 Jim, C.Y. 2017.



orientadas a sur, como en las ciudades construidas en el siglo III a.C. de Alejandría (Egipto) o Mohenjo-Daro (India)<sup>65</sup>. Por lo tanto, la arquitectura tradicional siempre ha buscado la sostenibilidad, en la medida de sus posibilidades, incluso desde el planteamiento urbano, consiguiendo un mínimo gasto energético tanto en la construcción como durante la vida útil del edificio.

En estos casos, la necesidad de supervivencia del ser humano lo llevó a adaptar su hábitat a las condiciones ambientales existentes mediante sistemas sencillos pero eficaces. Por ejemplo, la construcción de viviendas en el subsuelo. Esta solución se empleaba tanto en zonas cálidas como frías ya que el subsuelo ofrece unas adecuadas condiciones de confort térmico a determinada profundidad<sup>66</sup>, gracias a la inercia térmica de la gran masa de suelo y el control higrotérmico que proporciona.

La búsqueda de un fin común en la arquitectura, la estandarización y la globalización han terminado por eliminar o reducir la arquitectura vernácula a su mínima expresión, olvidando sus beneficios y solo recordando sus limitaciones. De nuevo, la educación y la accesibilidad a la información juegan un papel importante en este aspecto. Dar a conocer la realidad de la arquitectura vernácula de cada lugar, tanto sus pros como sus contras, puede terminar con los tabúes que hacen que en la sociedad actual se prefiera el último diseño de grandes cristaleras pensado en un despacho de arquitectos de Suiza que la vivienda basada en la típica construcción de barraca valenciana, por ejemplo. La arquitectura del espectáculo, la que políticamente se promociona y aquella que mediáticamente se publicita ha eclipsado en las últimas décadas a la arquitectura anónima, autóctona, vernácula o popular, que ha sido siempre, y en cada ubicación, el ejemplo perfecto de la arquitectura bioclimática<sup>67</sup>. Por lo tanto, cuando se toman decisiones sin argumentos ambientales, sociales o económicos, solo basada en los gustos y tendencias actuales, se está comprometiendo un poco más la situación ambiental que vivimos. En cambio, al tomar como ejemplo la arquitectura vernácula como base del desarrollo de un proyecto arquitectónico sostenible se conserva la esencia de la tipología arquitectónica que ha dado identidad cultural a nuestro entorno, lo cual no implica copiar estos ejemplos, sino aprender de sus estrategias ambientales empleando materiales y técnicas constructivas actuales<sup>68</sup>. Esta idea de la arquitectura con nuevos recursos, pero aprendizajes antiguos, puede llegar a desarrollar una nueva forma de construcción, más de acuerdo con la escala humana, más integrada en la naturaleza y térmicamente más económica, es decir, implicando un menor coste energético<sup>69</sup>.

#### 2.2.4 El diseño sostenible

Este apartado se va a centrar en el diseño sostenible, las pautas y principios para la consecución de los logros de la arquitectura sostenible. Un diseño sostenible, definido como aquel que no comprometa ninguno de los tres pilares de la sostenibilidad, debe ser eficiente ambiental, social y económicamente y capaz de nutrirse de los conocimientos de la arquitectura vernácula. Para la profundización y el conocimiento de todo lo que se va a exponer a continuación se han consultado los libros de Morales, *Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética*<sup>70</sup>, y de Ching y Shapiro, *Arquitectura ecológica. Un manual ilustrado*<sup>71</sup>.

Una de las premisas principales del diseño sostenibles es que, de manera natural, se evite el sobrecalentamiento del edificio en verano y, en invierno, que funcione como sistema de captación, control, regulación, acumulación y distribución de la energía necesaria para que se consigan las condiciones de bienestar<sup>72</sup>. Otras son, por ejemplo, la reducción de la dependencia de medios energéticos contaminantes o que escasean, Iminimizar el impacto ambiental o la mejora de la calidad del ambiente interior<sup>73</sup>.

65 Nieva, A.B., Del Pozo, A.V.-E. 2005.

66 Krzemińska, A., Zaręba, A., Dzikowska, A. 2017.

67 Britto, C. 2001.

68 Ramírez, J.D.M. 2019.

69 Neila, F.J., Frutos, C.B., Britto, C. 2004.

70 Ramírez, J.D.M. 2019.

71 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

72 Britto, C. 2001.

73 Neila, F.J., Frutos, C.B., Britto, C. 2004.



Por lo tanto, se busca proyectar un edificio capaz de alcanzar los objetivos ambientales, sociales y económicos, y satisfacer las necesidades humanas, empleando una menor cantidad de energía (a ser posible un consumo neto nulo) y sin perder de vista los costes. De acuerdo con Morales<sup>74</sup>, la máxima eficiencia energética en el comportamiento térmico de un edificio se consigue al incluir en el programa arquitectónico el análisis al detalle del clima donde se ubicará el edificio y las necesidades térmicas y visuales de los usuarios del espacio en cuestión. El programa arquitectónico, a su vez, consistirá en la construcción de un espacio habitable, útil, cómodo y bello.

Una manera bastante útil de afrontar el diseño de un proyecto sostenible es hacer un estudio de fuera hacia adentro. En este caso, el primer factor a estudiar será el emplazamiento. De acuerdo con la ubicación del edificio, se realizará un **análisis climático**, que aportará datos como la variación diaria y anual de temperaturas, la velocidad y dirección predominante del viento y la radiación solar. Estas variables se deberán relacionar con las propiedades termofísicas y ópticas de los materiales de construcción. Al fin y al cabo, un edificio será respetuoso con su entorno siempre y cuando se adapte a él<sup>75</sup>.

Un ejemplo extremo de la adaptación al clima para conseguir un diseño sostenible y eficiente en cuanto a su funcionamiento energético y ambiental se puede observar en la ciudad sostenible de Masdar (Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos). La propia ciudad, estandarte de las energías renovables y el cuidado al medio ambiente a partir del diseño de una ciudad inteligente, se diseña de acuerdo con las exigencias del clima. La primera actuación llevada a cabo, en los inicios de la construcción en 2008, fue un muro perimetral que pretendía proteger a la ciudad de los fuertes y cálidos vientos de la zona<sup>76</sup>. Cabe destacar, en esta ciudad, el proyecto del Masdar Institut (2015), de Foster + Partners (Figura 2.6)<sup>77</sup>. El diseño sostenible de este edificio se centra en el uso exclusivo de energía proviene de sistemas de captación solares, a la vez que emplea innovadoras técnicas y materiales para la construcción de las fachadas capaces de mantenerse frías a pesar de la incidencia directa del sol (colchones inflados realizados de Etileno-TetraFluoroEtileno, o ETFE). La adaptación al clima y el entorno también se aprecia en el cuidadoso estudio de la arquitectura vernácula del lugar. Para el enfriamiento del aire, este se consigue reinterpremando las torres de viento (también conocidas como captadores de viento o chimeneas de viento) y los espacios que combinan vegetación (especialmente escogida para que no requiera de grandes cantidades de agua para riego) y agua para favorecer el enfriamiento por evaporación. Por otro lado, parte de las aberturas o ventanas están recubiertas con una reinvención del *mashrabiya* (mirador envuelto con una celosía capaz de filtra la luz exterior). En este proyecto el *mashrabiya* se construye en hormigón reforzado con fibra de vidrio y coloreado con arena de la zona para minimizar el impacto visual del elemento (Figura 2.7).

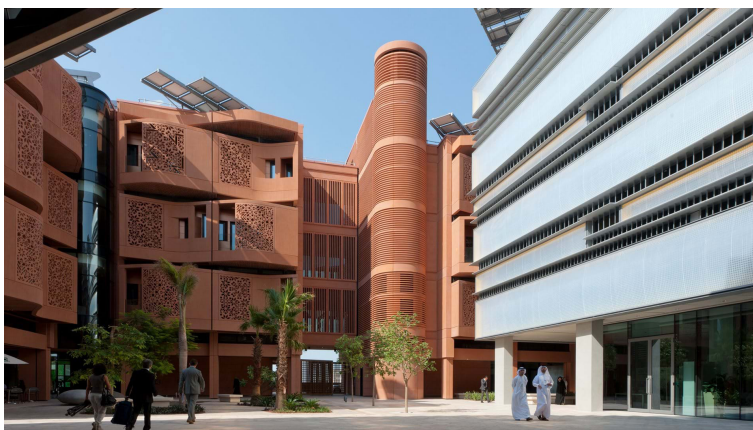


Figura 2.6. Masdar Institut, Masdar (Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos).

74 Ramírez, J.D.M. 2019.

75 Nieva, A.B., Del Pozo, A.V.-E. 2005.

76 Masdar. 2022.

77 Foster + Partners. 2022.

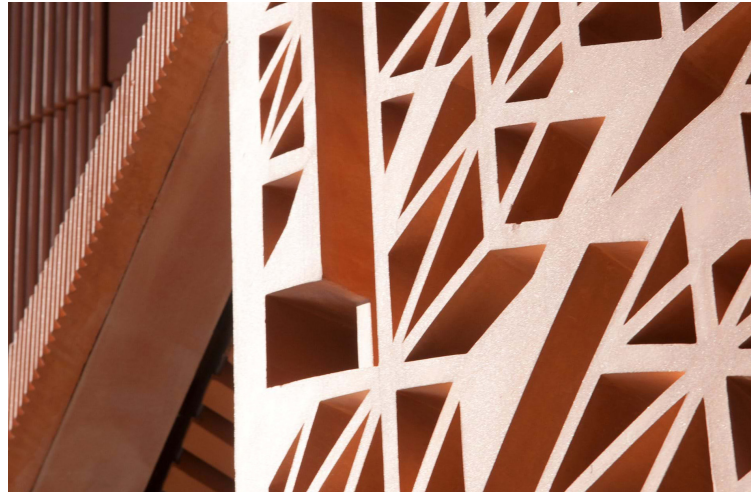


Figura 2.7. Reinterpretación del mashrabiya característico de la arquitectura vernácula del lugar.

Otro edificio, también ubicado en esta nueva ciudad sostenible, es el *Siemens Middle East Headquarters* (2013), de Sheppard Robson. Esta construcción también se basa en la reinterpretación de las torres de viento para favorecer el enfriamiento, empleando en este caso lamas de aluminio ligero en las fachadas exteriores para minimizar al máximo las ganancias por incidencia de radiación solar en las fachadas, a la vez que se permite la entrada de luz natural y las vistas desde el interior del edificio<sup>78</sup> (Figuras 2.8 y 2.9).

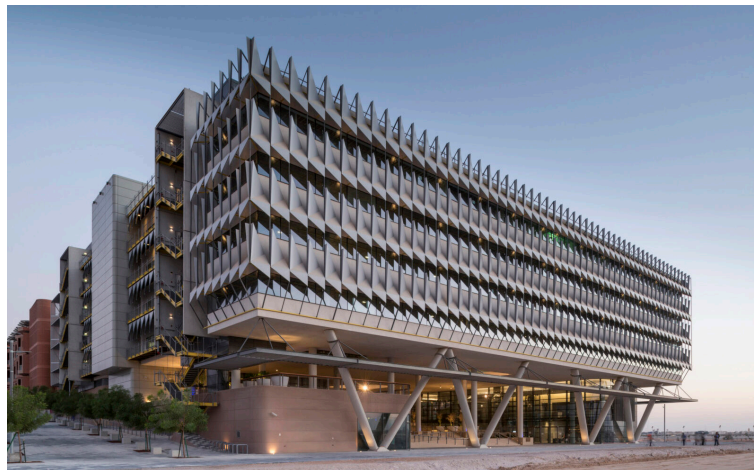


Figura 2.8. Siemens Middle East Headquarters, Masdar (Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos).

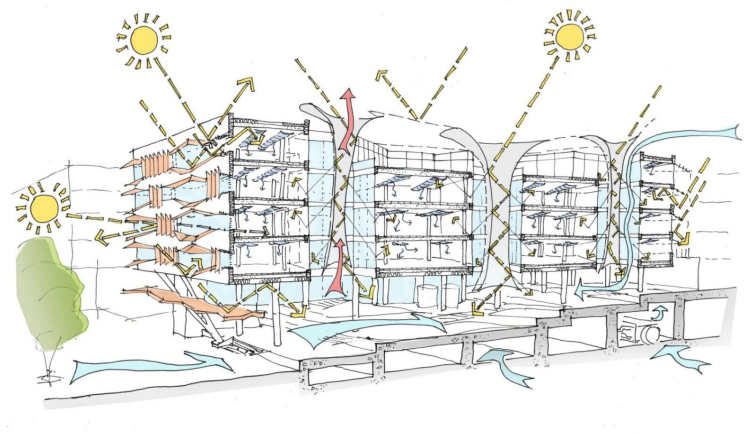


Figura 2.9. Estrategias de diseño pasivo para adaptación al clima: ventilación, luz natural y limitación de la incidencia solar directa.

78 Sheppard Robson. 2022.



Una vez determinado el entorno climático, la construcción del propio edificio debería tratar de minimizar la aparición de superficies duras o impermeables (Figura 2.10), ya que estas aumentan la escorrentía de agua de lluvia, generando mayores inundaciones, contaminación del agua, agotamiento de los acuíferos, etc. Se trata de limitar, así, el impacto de la urbanización.

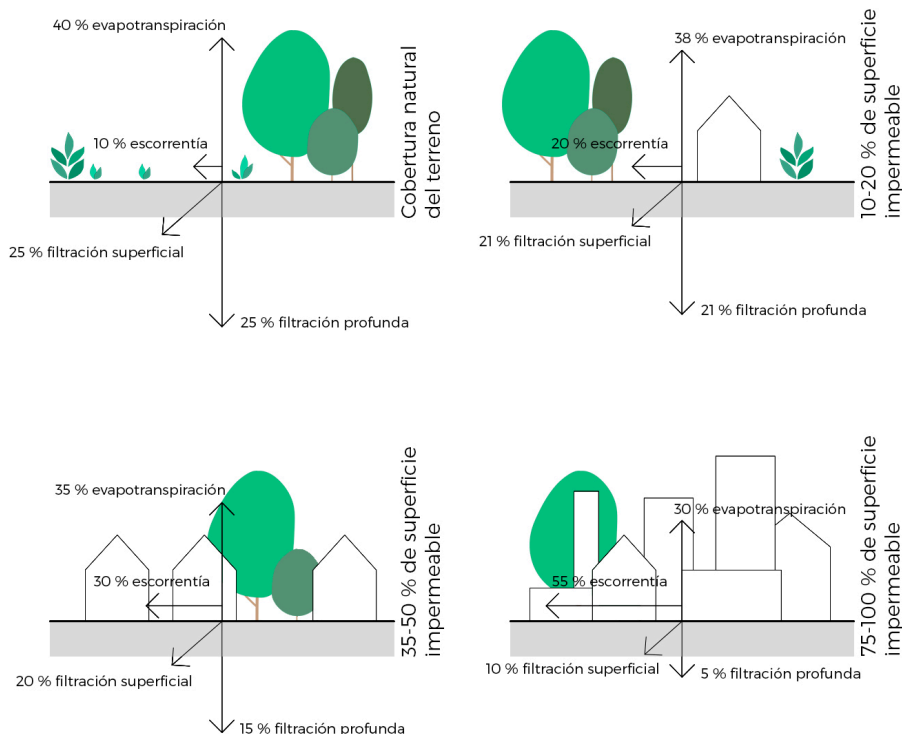


Figura 2.10. Cantidad de escorrentía de agua de lluvia en función del porcentaje de superficies impermeables.

Conforme continuamos en el recorrido desde el exterior hacia el interior del edificio, el siguiente punto a tratar es la forma construida. Los datos confirman que, a menor superficie en planta, menor consumo energético en cuanto a materiales, construcción y mantenimiento. Pero mucho más influyente que la superficie en planta se revela la superficie de la envolvente. Las ganancias de calor en verano (flujos positivos hacia el interior del edificio) y las pérdidas de calor en invierno (flujo negativo desde el interior del edificio hacia el exterior) se producen de forma proporcional a esta superficie. Es por ello que la normativa actual referente al ahorro de energía<sup>79</sup> se centra en establecer valores de transmitancia térmica máxima para los elementos de la envolvente de un edificio, limitando así en gran medida el consumo energético de un edificio. Estos valores se pueden conseguir de manera sencilla aumentando el aislamiento de la envolvente, pero eso implica un incremento en el consumo de materiales y en el coste de construcción, mientras que si se reduce la superficie de la envolvente se aumenta el ahorro energético al reducir las pérdidas y ganancias de calor, al mismo tiempo que se disminuye el consumo de materiales (y el coste energético asociado a estos) y el coste de construcción. Con la intención de relacionar estas dos variables de la forma de un edificio que afectan al consumo energético, superficie total en planta y superficie de la envolvente, se establece el factor de forma<sup>80</sup>. El porcentaje de disminución en el factor de forma se traduce en una reducción similar en el consumo energético del edificio, aunque un poco superior. Por ejemplo, un edificio en forma de L tiene un factor de forma un 8 % mayor que un edificio cuadrado y un edificio en forma de U un 14 % mayor, en ambos casos para la misma superficie de ocupación en planta. Por lo tanto, los edificios en forma de L o U tendrán un mayor consumo energético debido a su envolvente. La cubierta, como parte de la envolvente, también afecta al coeficiente de superficies y al respectivo consumo energético, en función de su diseño. Un volumen con una cubierta inclinada a un agua implica un aumento en el factor de forma, proporcional al aumento de la pendiente, y el respectivo aumento en el consumo energético, en comparación con el uso de una cubierta plana (con pendientes menores al 5 %).

79 Ministerio de Fomento. 2022a.

80 Britto, C. 2001.





Pero respecto a la envolvente, no solo resulta importante su superficie, sino también su ejecución. Como se ha indicado en el apartado 2.1, entre el 10 % y el 50 % del consumo energético de un edificio se produce debido a filtraciones de aire a través de la envolvente<sup>81</sup>. Es importante, por lo tanto, tratar de limitar las filtraciones de aire, de acuerdo con la normativa existente<sup>82</sup>, que se producen principalmente por puertas, ventanas, paso de conductos de ventilación, fisuras en el revestimiento exterior de muros o cubiertas, puentes térmicos, etc. Una herramienta útil para la detección de las filtraciones de aire son las termografías infrarrojas (IRT)<sup>83</sup>.

También resulta de vital importancia para minimizar el consumo energético la reducción de los puentes térmicos y la búsqueda de la máxima continuidad posible del material aislante en la envolvente térmica desde una etapa de diseño. Independientemente de conseguir la máxima continuidad, la mejor ubicación del aislamiento en un sistema multicapa, siempre que se trate de un emplazamiento que se usa de manera continuada, es lo más al exterior posible, ya que así la masa térmica se encuentra dentro de la envolvente, moderando los cambios de temperatura y sirviendo como acumulador de calor. La masa térmica se define como la capacidad de absorber y almacenar calor de los elementos constructivos. Además, permite evitar las condensaciones de agua en el interior debido a gradientes de temperatura superficiales. En el caso de edificios de uso temporal, como por ejemplo una residencia de fin de semana, resulta más interesante colocar el aislamiento térmico lo más al interior posible en el sistema multicapa, ya que así se consigue una climatización más rápida del interior.

Otro factor importante es la orientación del edificio, que afectará en gran medida a la captación de energía solar mediante paneles solares y al flujo de aire que atraviesa el edificio y que puede emplearse como herramienta de enfriamiento y control del confort interior en verano. La orientación más adecuada (en el hemisferio norte) para la mayor eficiencia de los paneles solares es al sur (Figura 2.11). Respecto a su inclinación, los paneles en horizontal o en vertical reducen la producción de energía, y depende en gran medida de la latitud del lugar geográfico y de la época del año en que necesitamos producir una mayor cantidad de energía<sup>84</sup> (Figura 2.12). Por ejemplo, la inclinación deseable en València (España), cuya latitud es de 40 °, se calcula restando o sumando a este valor el ángulo de inclinación aproximado de la tierra (23 °) para conseguir la máxima producción en verano o en invierno, respectivamente. Por lo tanto, en València, para una máxima producción en verano, se deben orientar los paneles a Sur e inclinador en un ángulo de 17 ° (40-23), mientras que, si se buscara la máxima producción energética en invierno, la orientación se mantendría a sur, pero la inclinación sería de 63 ° (40+23).

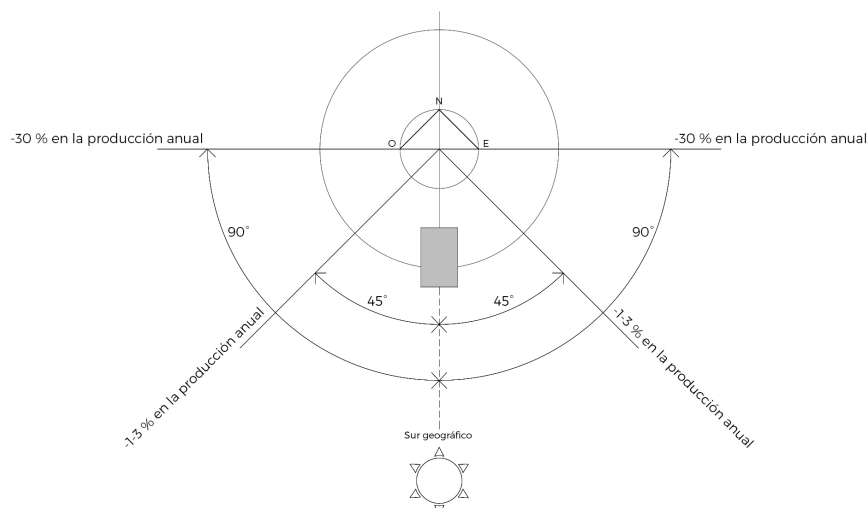


Figura 2.11. Producción de un panel solar en función de la orientación (valores para España).

81 Lerma, C., Barreira, E., Almeida, R.M.S.F. 2018.

82 Ministerio de Fomento. 2022a.

83 Lerma, C., Barreira, E., Almeida, R.M.S.F. 2018.

84 Mppt Solar. 2022.

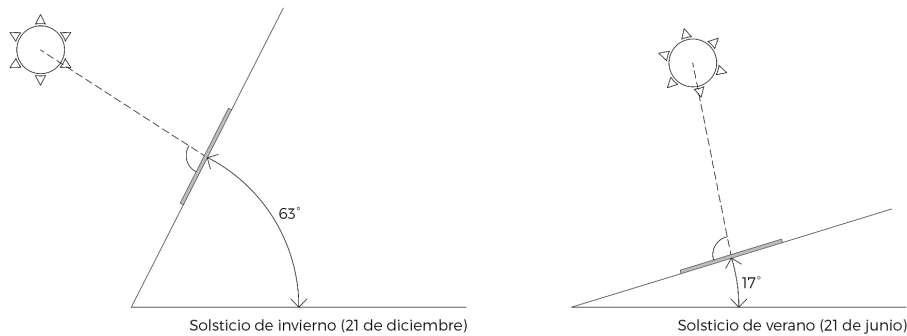


Figura 2.12. Inclinaciones para la máxima producción energética en verano y en invierno (valores para latitudes de 40 °, como Madrid o València, España).

Ya en el interior del edificio, resulta importante considerar que la temperatura interior de una estancia depende en gran medida de los aportes de calor y del uso de dicho espacio. También influyen en el confort general interior, a parte de la temperatura del aire interior, el nivel de iluminación, la calidad del aire, la ventilación natural y el confort acústico.

El **confort térmico** merece especial mención entre todos ellos, ya que define en gran medida el estado y la aceptación del espacio por parte de los usuarios. En edificios sostenibles, el mayor aislamiento en la envolvente permite que las variaciones de temperatura interior diarias y anuales sean menores, mientras que la limitación de las filtraciones reduce las corrientes de aire y disminuye el impacto de la baja humedad del exterior en invierno y la excesiva humedad en verano. De acuerdo con la encuesta de habitabilidad durante la crisis de la COVID-19, realizada por el CSIC, el 33 % de los encuestados en Madrid (España) cambiaría la temperatura de su vivienda, motivo por el cual casi el 45 % cambiaría el aislamiento global de su vivienda<sup>85</sup>.

### 2.2.4.1 Análisis climático: la influencia del clima

En primer lugar, se debe diferenciar entre clima y tiempo. Según la Real Academia Española (RAE)<sup>86</sup>, el clima es el “conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región”, mientras que el tiempo es el “estado atmosférico” en un determinado momento. Por lo tanto, el tiempo de un día determinado puede no coincidir con el clima característico de una zona. El tipo de clima de cada zona se puede definir siguiendo la clasificación Köppen<sup>87</sup>.

Una vez conocida esta diferencia, a la hora de realizar un proyecto arquitectónico, las principales variables o elementos que definen el estado medio de la atmosfera, es decir el clima, y que afectan al diseño, de acuerdo con Morales<sup>88</sup>, son las siguientes:

- **Temperatura.**

No solo es importante la temperatura en sí misma, sino también la relación entre temperatura y humedad, ya que a mayor temperatura y humedad se produce una sensación opresiva. Pero en cambio, si en un ambiente húmedo se baja la temperatura, los usuarios del espacio pasan directamente de la sensación opresiva a la incomodidad del frío, sin alcanzar un punto intermedio de confort.

En relación con los aspectos del programa arquitectónico, en climas cálidos extremos una buena estrategia puede ser construir edificios altos y calles estrechas, consiguiendo que estas estén sombreadas la mayor parte del día y así los muros de los edificios no reciben radiación solar directa y la sensación térmica de los peatones sea de mayor frescura. Así mismo, los muros no absorberán y almacenarán tanta cantidad de energía en forma de calor, por lo que los flujos hacia el interior serán mucho menores y se conseguirá un espacio más confortable. La construcción de muros de mucho espesor que sean capaces de desfasar

85 Vilches, T.C. 2020.

86 Real Academia Española (RAE). 2022.

87 Climate Change & Infectious Diseases Group. 2019.

88 Ramírez, J.D.M. 2019.



y amortiguar al máximo la onda térmica también es recomendable en este tipo de climas, al igual que en climas extremos polares. En climas cálidos no extremos la estrategia principal se encamina a conseguir una mayor ventilación natural.

- **Humedad relativa.**

Cuando la humedad relativa del aire se sitúa entre 30-70 % no es necesario establecer ninguna estrategia de diseño térmico particular, pero cuando se encuentra por debajo del 30 % y la temperatura se encuentra por encima de las condiciones de comodidad térmica (mayor a 28 °C), es necesario aplicar herramientas para conseguir un enfriamiento evaporativo del aire (fuentes, balsas de agua, vegetación, etc.). En condiciones de humedad por encima del 70 % y altas temperaturas se debe optar por técnicas de ventilación y circulación continua del aire.

**Dirección y velocidad del viento dominante.**

De acuerdo con sus condiciones de temperatura y humedad se puede aprovechar el viento en la climatización natural de los edificios, pero en el caso de que estas condiciones no sean adecuadas se debe proteger la envolvente o cerrar las ventanas. En el caso de climas cálidos no extremos se deben aplicar técnicas que posibiliten la circulación del aire libremente por el edificio cuando sea necesario, en cambio en climas extremos, tanto fríos como cálidos, se debe pensar en proteger la envolvente respecto al viento.

- **Radiación solar.**

La radiación solar global incidente ( $E_t$ ) que llega a la superficie terrestre y a los espacios arquitectónicos está compuesta por la suma de la radiación solar directa ( $E_d$ ), la radiación solar difusa del cielo ( $E_d$ ) y la radiación solar reflejada desde superficies cercanas ( $E_r$ ). En todos los casos, el calor acumulado por la envolvente, debido a la radiación, acaba penetrando en el interior del edificio con un retardo térmico, o desfase, y una amortiguación que dependen de la masa y anchura de los elementos opacos y del tipo de ventanas.

Esta es una de las variables más importantes, por lo que se deben diseñar envolventes que la aprovechen en climas y/o en épocas frías del año. En este último caso la geometría y la orientación de las aberturas en la envolvente se debe cuidar con especial detalle ya que en épocas cálidas no es adecuado que la radiación solar entre en el edificio de forma directa.

#### **2.2.4.2 El confort térmico**

El confort humano, o bienestar, y en algunos casos incluso la supervivencia, han dependido de la habilidad con que los edificios y espacios se han adaptado al medio ambiente climático. Pero resulta también muy importante definir el concepto de confort o comodidad térmica.

La comodidad térmica se define en la norma ISO 7730 como “aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico”<sup>89</sup> (Tabla 2.1). Esta definición debe entrelazarse con los posibles usos o disposiciones del espacio, ya que la actividad de los ocupantes determinará en cada caso la comodidad térmicamente. Por lo tanto, se debería combinar la definición de confort térmico con el comportamiento esencial del metabolismo del ser humano; en palabras de Morales<sup>90</sup>: “el cuerpo humano es, entre otras cosas, un almacén de calor, mismo que se necesita perder constantemente y a una rapidez determinada y fijada por el metabolismo de cada persona, que permita mantener la temperatura corporal interna entre 36,5 y 37,5 °C con el mínimo esfuerzo, y permita el desarrollo del trabajo fisiológico en óptimas condiciones”.

Así, podemos decir que la comodidad térmica de los usuarios de un edificio se obtiene cuando se logra un equilibrio entre las ganancias y las pérdidas de calor del propio cuerpo. Un ejemplo claro de estas ganancias y pérdidas de calor en el cuerpo humano podría observarse en un día cálido y húmedo. La temperatura del aire exterior va aumentando y el cuerpo humano gana calor por radiación y conducción, por lo que solo se pueden producir pérdidas por evaporación. El cuerpo empieza a sudar para mantener una temperatura

89 Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). 2006.

90 Ramírez, J.D.M. 2019.



interior en torno a 37 °C<sup>91</sup>, pero si el ambiente tiene una gran humedad relativa el sudor no se evapora, porque el aire no admite más humedad, y la temperatura del cuerpo sigue ascendiendo. En este caso el cuerpo recibe señales de exceso de calor, efectuando ciertos cambios para poder restablecer la sensación de comodidad y bienestar (disminución de la actividad, cambio de ropa, desplazamiento a un ambiente diferente, etc.). De acuerdo con este último punto, el bienestar térmico se podría definir como la respuesta del individuo a parámetros ambientales y personales<sup>92</sup>, por lo que las variables que afectan a la comodidad térmica se pueden agrupar en:

- Condiciones ambientales: temperatura del aire, humedad del aire, velocidad del aire, radiación solar y radiación infrarroja procedente de cuerpos u objetos del entorno. Estas variables se pueden modificar mediante el diseño arquitectónico para mejorar el microclima interior<sup>93</sup>.
- Vestimenta y variables del metabolismo (edad, peso, complejidad, actividad, etc.).

TEMPERATURA	SENSACIÓN AMBIENTAL	SENSACIÓN FÍSICA	RESPUESTA FÍSICA	ESTADO DE SALUD
> 40 °C	Límite de tolerancia		Calentamiento del cuerpo	Colapso circulatorio
40 °C	Muy caliente	Muy incómodo	Problemas de regulación	Aumento de peligro por insolación
35 °C	Caliente		Aumento de tensión causada por sudoración y flujo sanguíneo	Perturbación cardiovascular
30 °C	Templado	Incómodo	Regulación normal por sudoración y cambio vascular	
25 °C	Neutral	Cómodo	Regulación cardiovascular	Salud normal
20 °C	Ligeramente fresco	Ligeramente incómodo	Aumento de pérdida de calor seco	
15 °C	Fresco/frío			Aumento de molestias al secarse las mucosas y la piel
10 °C	Muy frío	Incómodo	Vaso contracción en manos y pies, estremecimiento	Dolor muscular y deterioro de circulación periférica

Tabla 2.1. Respuesta térmica en el cuerpo humano.

De acuerdo con Coma *et al.*<sup>94</sup>, en el clima mediterráneo cálido la temperatura de confort en verano se sitúa entre los 23 y 26 °C, mientras que en invierno el rango de confort se establece entre los 20 y 24 °C. De acuerdo con el *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE)*<sup>95</sup>, para actividades sedentarias propias de oficinas, aulas, viviendas, etc. la temperatura de confort se sitúa entre 23 y 25 °C en verano, con un rango de humedades entre 45 y 60 %. En invierno la temperatura de confort se encuentra entre los 21 y 23 °C, con humedades entre los 40 y 50 %. Cabe indicar que la influencia de la humedad en la sensación térmica, cuando las temperaturas se sitúan cerca al bienestar (< 26 °C) y con niveles de actividad moderados, es pequeña<sup>96</sup>. Un aumento de la humedad relativa del 10 %, en estas condiciones, da lugar a una sen-

91 Ramírez, J.D.M. 2019.

92 Neila, F.J., Frutos, C.B., Britto, C. 2004.

93 AENOR. 2006.

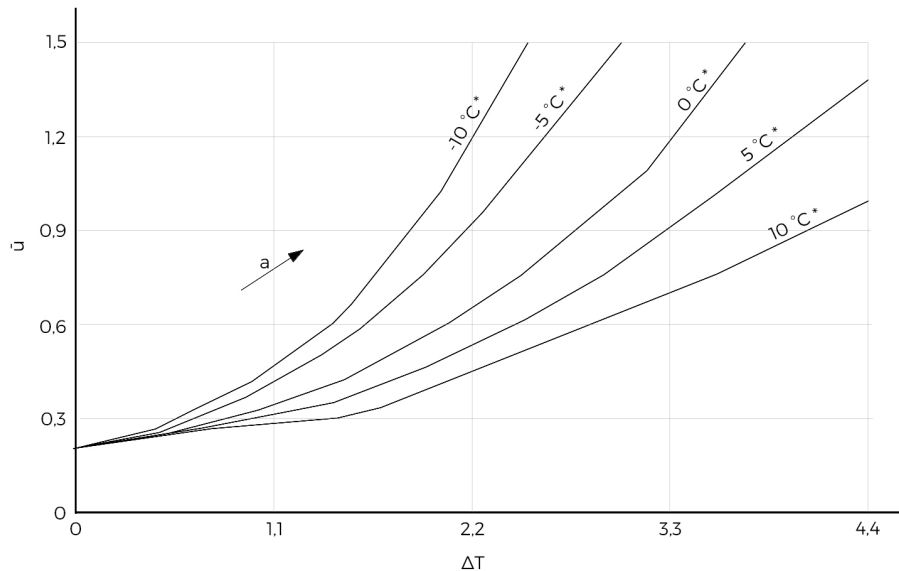
94 Coma, J., Pérez, G., Solé, C., *et al.* 2016.

95 Ministerio de Presidencia. 2021.

96 AENOR. 2006.



sación de calor equivalente a un aumento de  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>97</sup>. La velocidad del aire también influye en el bienestar térmico global<sup>98</sup>, pudiéndose emplear para compensar la sensación de calor provocada por un aumento de temperatura. La gráfica que se observa en la figura 2.13 muestra hasta donde se puede aumentar la temperatura en función de la velocidad del aire, partiendo de una velocidad de  $0,2\text{ m/s}$  y  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , considerando una vestimenta de verano ( $0,5\text{ Clo}$ ) y actividades sedentarias<sup>99</sup>. En la gráfica se indica que el beneficio que puede obtenerse incrementando la velocidad del aire depende de la diferencia entre la temperatura de la superficie de la piel/ropa y la temperatura del aire.



Para actividad ligera y fundamentalmente sedentaria,  $\Delta T$  debería ser  $< 3\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\bar{u} < 0,82\text{ m/s}$ .

$\Delta T$  aumento de temperatura por encima de  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

$\bar{u}$  velocidad media del aire (m/s).

a límites para actividad ligera y fundamentalmente sedentaria.

\* temperatura radiante media – temperatura del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Figura 2.13. Velocidad del aire ( $\bar{u}$ ) requerida para compensar el incremento de la temperatura.

Como ya se ha comentado, las especificaciones de temperatura de confort y humedades relativas se pueden ver modificadas por características climáticas, pero también por la vestimenta, afectando a las ganancias y pérdidas de calor, y permitiendo la adaptación del cuerpo con mayor o menor ropa. Para identificar la resistencia térmica de la ropa se emplea la unidad Clo, pensada para que una persona desnuda tenga un valor de  $0\text{ Clo}$  y alguien con un traje típico de negocio tenga un valor de  $1\text{ Clo}$ <sup>100</sup>.

Debido a todas estas posibles variaciones de las condiciones de confort y adaptaciones a la situación del entorno (con mayor o menor ropa, realizando una mayor o menor actividad física, etc.), parece necesario determinar las condiciones de confort, no como un dato invariable, sino como una variable que dependerá de la circunstancia concreta y de los usuarios del espacio. En la norma ISO 7730: Ergonomía de los ambientes térmicos<sup>101</sup> se presentan una serie de métodos para predecir la sensación térmica general y el grado de incomodidad, o insatisfacción térmica, de las personas expuesta a ciertos ambientes térmicos.

Justamente debido a las diferencias individuales de cada una de las personas que se encuentran en un ambiente determinado es imposible determinar un ambiente térmico que pueda satisfacer a todo el mundo, pero se pueden definir ambientes considerados aceptables para un cierto porcentaje de ocupantes<sup>102</sup>. En la propia norma ISO 7730 se especifican las condiciones de confort (temperaturas operativas y velocidades

97 AENOR. 2006.

98 Ibídem.

99 Ibídem.

100 Ramírez, J.D.M. 2019.

101 AENOR, 2006.

102 Ibídem.



medias del aire) para alcanzar el confort térmico en diferentes entornos construidos, en función de categorías de ambientes térmicos (A-B-C) también definidos en esta norma<sup>103</sup> (Tabla 2.2). Para la interpretación de esta tabla se considera que la vestimenta es de 0,5 Clo en verano y 1,0 Clo en invierno.

TIPO DE ESPACIO	ACTIVIDAD (W/m <sup>2</sup> )	CATEGORÍA	TEMPERATURA OPERATIVA (°C)		MÁXIMA VELOCIDAD MEDIA DEL AIRE <sup>1</sup> (m/s)	
			Verano <sup>2</sup>	Invierno <sup>2</sup>	Verano	Invierno
Despacho individual Oficina diáfana Sala de conferencias Auditorio Cafetería/Restaurante Aula	70	A	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,12	0,10
		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 <sup>3</sup>
Aula de preescolar	8	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 <sup>3</sup>
		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 <sup>3</sup>
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 <sup>3</sup>
Gran almacén	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 <sup>3</sup>
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 <sup>3</sup>
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 <sup>3</sup>

<sup>1</sup> La máxima velocidad media del aire está basada en una intensidad de turbulencia del 40 % y la temperatura del aire es igual a la temperatura operativa. La humedad relativa considerada es del 60 % en verano y del 40 % en invierno. Para determinar la máxima velocidad media del aire en ambas estaciones se toma la temperatura más baja del rango.

<sup>2</sup> Verano: época de refrigeración / Invierno: época de calefacción

<sup>3</sup> Por debajo del límite de 20 ° C.

Tabla 2.2. Ejemplos de condiciones de confort de espacios construidos, en función de las categorías de ambiente térmico.



### 2.3 LA CIUDAD NATURALIZADA

La dimensión sostenible de la arquitectura se plantea como el trasfondo necesario de cualquier actividad que se realice en el campo del diseño y la construcción de edificios. Así mismo, igual que era insostenible obviar la biosfera donde se desarrollan las actividades sociales y económicas de la sociedad, no se puede olvidar, como se ha destacado en el apartado 2.2.4, el entorno del edificio. El verdadero escenario cotidiano de más de la mitad de la población mundial: la ciudad. El planeamiento de esta, su diseño y funcionalidad deben de responder, igualmente, a los principios de la sostenibilidad: el fomento del transporte público accesible para todos y conectando todas las partes de la ciudad, el desarrollo de servicios públicos y de calidad, la construcción de edificios e infraestructuras económicas y ambientalmente saludables o el diseño de espacios de convivencia y educación.

Todo esto debe tener cabida dentro de la ciudad, que cada día habitan más personas. Si se quiere alcanzar un planeta sano a través de la construcción sostenible de espacios y edificios, debemos considerar primero cómo conseguir una ciudad sana, y al mismo tiempo, una sociedad sana, ya que la relación entre las personas y su entorno es obvia: los habitantes de una zona determinada se han debido adaptar a esta, a sus variaciones climáticas y a sus características topográficas. La salud física, psicología y social depende, en cierta medida, de la calidad de los espacios de la ciudad. La contaminación, la existencia o no de zonas verdes, la facilidad de acceso a espacios y servicios o el confort del interior de los edificios afecta a los ciudadanos.

Varios estudios revelan esta relación entre la calidad, o la salud, de los espacios de una ciudad y la salud de sus habitantes. En concreto, un estudio realizado por Peen *et al.* demuestra que las probabilidades de tener desórdenes del carácter son un 28 % más altas en los adultos que viven en áreas urbanas que en áreas rurales<sup>104</sup>. Esto no debe llevar a la simplificación de que la urbanización en sí misma es la causa inicial del desorden<sup>105</sup>, sino que abre la puerta a plantearnos cuáles son las enfermedades de nuestra ciudad, para solucionarlas y poder hacer de la urbanización una solución y no un problema. Una de las hipótesis defendidas por Peen *et al.* asume que existen varios factores ambientales que generan enfermedades<sup>106</sup>. Se puede tratar, por un lado, de factores físicos, como la contaminación del aire, la densidad de población o el efecto de isla de calor urbano, y, por otro lado, a factores sociales, como el estrés, la falta de contacto social o el escaso contacto con la naturaleza. La mayoría de estos factores son más comunes en las áreas urbanizadas<sup>107</sup>, hecho que explica que en estas zonas ocurran más patológicas físicas y psíquicas. En este sentido, las áreas naturales, tanto si son o no creadas por el ser humano, aportan beneficios psicológicos y físicos a los usuarios de la ciudad<sup>108</sup>. De hecho, programas como *Ciudades Saludables*, de la OMS, o *Healthy Communities*, de la UE, han reconocido abiertamente el papel de la naturaleza en ambientes urbanos como factor reductor del estrés, los problemas de asma y el insomnio, a la vez que facilita una vida más natural y saludable<sup>109</sup>.

Parece que la principal enfermedad de nuestras ciudades es, por lo tanto, la falta de naturaleza. De nuevo, el olvido del pilar ambiental hace más evidente la necesidad de que la sostenibilidad, en su defensa del equilibrio entre lo ambiental, lo social y lo económico, se refleje en la ciudad. El riesgo no es solo respecto a las ciudades del presente, sino con las ciudades del futuro y las generaciones que vendrán. Las personas que nacen y viven en ciudades poco naturalizadas se adaptan a un nuevo concepto de lo que es ambientalmente normal<sup>110</sup>. Para ellos una ciudad sin verde, llena de asfalto y contaminación representa la norma, modificando (y normalmente empeorando) con el paso del tiempo los criterios y estándares de calidad de la ciudad. El contacto con la naturaleza en el día a día puede suponer, no solo un ambiente más saludable para el desarrollo físico y psicológico de las personas, sino también un recordatorio colectivo de los estándares mínimos y los requisitos ambientales indiscutibles de una ciudad sana.

104 Peen, J., Schoevers, R.A., Beekman, A.T., *et al.* 2010.

105 *Ibidem.*

106 *Ibidem.*

107 *Ibidem.*

108 Hartig, T., Kahn, P.H. 2016.

109 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

110 Hartig, T., Kahn, P.H. 2016.



Por lo tanto, es necesaria la renaturalización en las ciudades, sintetizando los procesos naturales y las funciones de los ecosistemas naturales en las infraestructuras urbanas a través de un nuevo diseño sostenible, conservando la naturaleza que todavía quede intacta y restaurando zonas para acercarlas de nuevo a su estado natural previo<sup>111</sup>. La recuperación de la naturaleza en el ámbito urbano también debería reflejar, paralelamente, la necesaria conexión de la arquitectura y el planeamiento sostenible con la vida diaria de los usuarios, no solo consiguiendo su implicación individual en el proceso de promoción de la arquitectura sostenible<sup>112</sup>, sino también el disfrute colectivo de los beneficios de este nuevo pensamiento, defendiendo la educación ambiental también en futuras generaciones.

Cabe destacar que esta renaturalización de las ciudades puede conllevar ciertos riesgos, como la *gentrificación verde*<sup>113</sup>. Los espacios naturales y abiertos mejoran la apreciación y la valoración de los barrios cercanos, pudiéndose producir un desplazamiento de la población existentes debido a un aumento del valor económico en todos los aspectos de la vida del barrio. Resulta muy importante evitar, en la medida de lo posible, que la renaturalización de la ciudad genere focos de desigualdad social y económica. Esta introducción de la naturaleza en las ciudades, por lo tanto, no solo deberá responder a diseños estéticos y de acuerdo con el funcionamiento del ecosistema, sino que también deberían de reflexionar sobre los usuarios que los disfrutaran social y económicamente, fomentando el equilibrio de los tres pilares de la sostenibilidad<sup>114</sup>.

Un ejemplo relevante de esta recuperación de la naturaleza en las ciudades, a la vez que se revitaliza social y económicamente el entorno, es el proyecto del *Landscape Park Duisburg Nord* (2002), del grupo de arquitectos Latz & Partners. Esta intervención se sitúa dentro de un parque de mayores dimensiones que trata de estructurar y dinamizar, a modo de gran alfombra verde, el área norte del Rin-Westfalia y las ciudades de la región de Emscher (Alemania). Dentro del *Landscape Park* se han mantenido elementos de su pasado industrial, como la planta de altos hornos Thyssen-Meiderich o una planta metalúrgica (Figura 2.14 y 2.15). La vegetación se proyecta para que su crecimiento *silvestre* conquiste los espacios sin uso actual, aportando una nueva función y estética a los elementos industriales preexistentes (por ejemplo, algunos muros de estas construcciones se emplean como rocódromos). Esta intervención que pretende renaturalizar un espacio previamente abandonado entre dos suburbios de la ciudad, a la vez que se integra en la Infraestructura Verde, aporta, además, un valor social, gracias a las instalaciones deportivas, culturales o recreativas, y económico, ya que, por ejemplo, el entorno ha servido de inspiración para películas y series de televisión<sup>115</sup>.

Pero la renaturalización de la ciudad también se puede plantear como la base de nuevos proyectos de edificios, como por ejemplo en bloques de viviendas donde los elementos naturales conviven con las personas en su ámbito más privado, la casa. Esta propuesta también se ve respaldada por organizaciones de relevancia mundial, como la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que llama a la necesaria reducción de las emisiones de carbono, llegando a la neutralidad o emisiones cero para el año 2050 en todos los sectores, incluido, especialmente, en los nuevos edificios construidos<sup>116</sup>. Un ejemplo de ello, uniendo el espíritu sostenible con la arquitectura de vanguardia, es el proyecto todavía sin construir del edificio *Energy Hub*, diseñado por el estudio de arquitectura BIG para el campus universitario Westbank de San José (California, EE.UU.). El diseño, la forma y la construcción del edificio tienen como objetivo no solo no producir CO<sub>2</sub>, sino también consumir dióxido de carbono gracias a la introducción del elemento vegetal en la estructura y esencia del propio edificio, siendo un ejemplo de ello el planteamiento de la azotea como un parque urbano en altura, devolviendo a la ciudad un espacio natural tras la construcción del edificio<sup>117</sup> (Figura 2.16).

Gracias a proyectos como estos, la degradación ambiental va reduciéndose y la educación y el conocimiento que le permite a la sociedad conocer de dónde viene el deterioro del medio ambiente va aumentando, haciéndola avanzar por un camino que impida volver a diseñar y construir ciudades enfermas de asfalto.

111 Hartig, T., Kahn, P.H. 2016.

112 Liu, K.S., Liao, Y.T., Hsueh, S.L. 2017.

113 Overstreet, K. 2021.

114 *Ibidem*.

115 Instituto Monsa de Ediciones. 2007.

116 Organización de las Naciones Unidas (ONU). 2020.

117 Afasia archzine. 2021; Westbank Campus. 2022.





Figura 2.14. Landscape Park Duisburg Nord (Duisburg, Alemania).



Figura 2.15. El pasado industrial se renaturaliza tras quedar sin uso.



Figura 2.16. Proyecto de edificio sostenible Energy Hub del estudio de arquitectura BIG.

Un ejemplo muy evidente de la importancia de la educación en el futuro sostenible de la arquitectura y las ciudades se puede observar en la situación vivida durante la crisis sanitaria de la COVID-19 en 2020. La obligación de permanecer en la vivienda ofreció una nueva visión sobre esta, poniendo en evidencia su falta de espacios para la relación, el contacto con la naturaleza o, simplemente, con el aire exterior. En la ciudad



densificada actual, la mayoría de las personas solo pueden disponer de espacios con naturaleza en un balcón, ya que no siempre la cubierta es accesible, y aun así no todo el mundo tiene un balcón<sup>118</sup>. De acuerdo con los resultados obtenidos en la encuesta de habitabilidad de las viviendas españolas, realizada por el CSIC durante la cuarentena impuesta por la COVID-19, la mitad de las viviendas participantes en Madrid (España) no tienen espacio abierto exterior y entorno al 60 % de los encuestados, al ser preguntados por qué cambiarían en su vivienda, respondieron por el espacio exterior<sup>119</sup>. Surge la duda y la necesidad de repensar la vivienda, redefinir cuales son las características que le aportan confort, no solo térmico o acústico, y que la convierten en una vivienda sana, y a sus usuarios en personas sanas.

Esto mismo se puede entender en las palabras de Paulo Palha en el periódico El País, “el diseño de edificios sin vegetación en las ciudades supone olvidar las necesidades de sus habitantes”<sup>120</sup>. Así mismo ocurre con el diseño de espacios sin vegetación en las propias ciudades. Otro ejemplo de esta naturalización de la ciudad es el proyecto de la rehabilitación de la Plaza de Lisboa (Oporto, Portugal) en 2013. El área comercial existente en planta baja se cubre con una cubierta ajardinada con olivos y parcialmente accesible<sup>121</sup>, de una extensión de 5000 m<sup>2</sup>, introduciendo el concepto verde en una zona urbana densamente poblada (Figura 2.17).

Otro proyecto que ejemplifica la introducción del elemento verde dentro del tejido urbano, aprovechando para convertirlo en un importante elemento de dinamización social, es el complejo construido en 2017 en Brno (República Checa), el *Open Gardens*. El edificio, además de ahorrar en el consumo energético y de agua gracias a la cubierta ajardinada y al uso de placas solares, funciona como parque y punto de interacción y socialización<sup>122</sup> (Figura 2.18).

Se observa en este ejemplo el importante papel social de los espacios verdes en la ciudad. Entre las mejoras sociales derivadas de la naturalización de las ciudades destaca la diversidad de usos introducida en la urbe, su contribución a la vida sana y activa, el aumento de la justicia social al abrir estos espacios a todas las clases sociales y edades, la oportunidad de interactuar y ampliar la red social y el hecho de que estos espacios se convierten en lugares de coexistencia cultural y en entornos aptos para desarrollar la educación ambiental de los niños y adultos<sup>123</sup>. La introducción de espacios verdes también permite alcanzar beneficios económicos, ya que se pueden concebir como espacios para la producción de frutas y verduras (huertos urbanos) y aportan valor económico a las áreas del entorno<sup>124</sup>.



Figura 2.17. Vista de la zona ajardinada de la Plaza de Lisboa, en Oporto (Portugal).

118 Maiztegui, B. 2020.

119 Vilches, T.C. 2020.

120 De Felipe, I. 2018.

121 Kampodomo. 2019.

122 Ibídem.

123 Telichenko, V., Benuzh, A., Mochalov, I. 2017.

124 Ibídem.



Figura 2.18. Open Gardens, en Brno (República Checa).

En China, los grandes problemas relacionados con la contaminación, la congestión, la habitabilidad y el cambio climático llevaron al CDDB (del inglés *China Development Bank Capital*) a iniciar en 2013 un programa que pretende crear un marco de trabajo, tanto a nivel del gran país asiático como de uso internacional, para el desarrollo urbano sostenible, inteligente y verde<sup>125</sup>. En base a este proyecto desarrollaron las *12 Green Guidelines*, donde se introducen la arquitectura sostenible y los espacios verdes públicos dentro de la ciudad como métodos para reducir la congestión, mejorar la calidad del aire, reducir el ruido urbano y disminuir el consumo energético. A la vez, se consiguen beneficios económicos como aumentar el valor de las propiedades cercanas a los espacios verdes, y beneficios sociales gracias a que las ciudades son más saludables y atractivas<sup>126</sup>.

La arquitectura sostenible debe desarrollarse en este contexto como una parte más de la naturalización de la ciudad, o como el motor para la introducción de los espacios verdes en la urbe, defendiendo la reconciliación ecológica. Así se consigue una nueva ecología urbana, capaz de crear un nuevo tipo de naturaleza protegiendo la biodiversidad y los diferentes ecosistemas<sup>127</sup>. La calidad de las ciudades dependerá, por lo tanto, de cómo los espacios verdes estén diseñados<sup>128</sup>, aplicando nuevas técnicas y nuevos diseños para defender el bienestar y la salud del medio ambiente y los ciudadanos.

### 2.3.1 La Infraestructura Verde

La nueva ciudad naturalizada debe, por lo tanto, introducir espacios verdes en su tejido y valorar el acercamiento y la recuperación de ecosistemas existentes. Pero, al igual que la movilidad es de gran importancia en el tejido urbano debido a la necesaria conectividad de los espacios, las actividades y las personas, la lógica del entramado de elementos verdes también lo es. La conexión entre estos, creando una red verde, permite integrar de forma adecuada los espacios naturales dentro de la ciudad, creando una Infraestructura Verde que permite que se gestionen los recursos naturales disponibles de manera más eficiente e inteligente (véase apartado 2.2.1).

El objetivo principal de la Infraestructura Verde, de acuerdo con la Comisión Europea, es “mejorar la capacidad de la naturaleza para facilitar bienes y servicios ecosistémicos múltiples y valiosos como agua y aire limpios”<sup>129</sup>. Los beneficios que se pretenden conseguir con el desarrollo de esta interconexión entre espacios verdes es la mejora de la vida y el bienestar humano, consiguiendo un medio ambiente de alta calidad

125 Huang, C.C., Busch, C., He, D., et al. 2015.

126 *Ibidem*.

127 Sutton, R.K. 2015.

128 Telichenko, V., Benuzh, A., Mochalov, I. 2017.

129 Comisión Europea. 2014.



en el que vivir y trabajar; la mejora de la biodiversidad, al reconectar zonas naturales aisladas y aumentar la movilidad de la fauna; la protección contra el cambio climático y otras catástrofes medioambientales, por ejemplo mediante la reducción de las inundaciones, el aumento de la captación de CO<sub>2</sub> o evitando la erosión del suelo; y un enfoque más inteligente e integrado del desarrollo, garantizando el uso eficiente del suelo, cada vez más limitado<sup>130</sup>.

<p><b>Servicios medioambientales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suministro de agua limpia.</li> <li>• Eliminación de contaminantes del agua y el aire.</li> <li>• Mejora de la polinización.</li> <li>• Protección contra la erosión del suelo.</li> <li>• Retención de las aguas pluviales.</li> <li>• Incremento del control de plagas.</li> <li>• Mejora de la calidad del suelo.</li> <li>• Reducción de la ocupación del terreno y del sellado del suelo.</li> </ul>
<p><b>Servicios sociales</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de la salud y el bienestar de las personas.</li> <li>• Creación de puestos de trabajo.</li> <li>• Diversificación de la economía local.</li> <li>• Ciudades más atractivas y verdes.</li> <li>• Mayor valor de la propiedad y distinción social.</li> <li>• Soluciones de energía y transporte más integradas.</li> <li>• Mejora de las oportunidades de ocio y turismo.</li> </ul>
<p><b>Servicios en relación con la mitigación del cambio climático y adaptación a este</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mitigación de las inundaciones.</li> <li>• Fortalecimiento de la resiliencia de los ecosistemas.</li> <li>• Almacenamiento y retención de carbono.</li> <li>• Mitigación de los efectos urbanos de isla de calor (UHI).</li> <li>• Prevención de catástrofes (como tormentas, incendios, forestales, deslizamientos de tierra).</li> </ul>
<p><b>Servicios para la biodiversidad</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejora de los hábitats para la vida silvestre.</li> <li>• Corredores ecológicos.</li> <li>• Permeabilidad del paisaje.</li> </ul>

Tabla 2.3. Servicios prestados por la Infraestructura Verde.

Como se puede observar en la tabla 2.3, la Infraestructura Verde es multifuncional, es decir, puede configurar escenarios capaces de aportar beneficios y soluciones a un amplio abanico de partes interesadas, así como a la sociedad en general, mientras que las infraestructuras *grises*, al contrario, suelen tener un único objetivo o función<sup>131</sup>. Los principales elementos que responden a los requisitos necesarios para formar parte de la Infraestructura Verde se indican a continuación (Figura 2.19 y Tabla 2.4), destacando qué elementos propios de la arquitectura verde pueden formar parte de esta red, como las cubiertas ajardinadas, los pavimentos drenantes o las fachadas vegetales.

130 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

131 Comisión Europea. 2014.

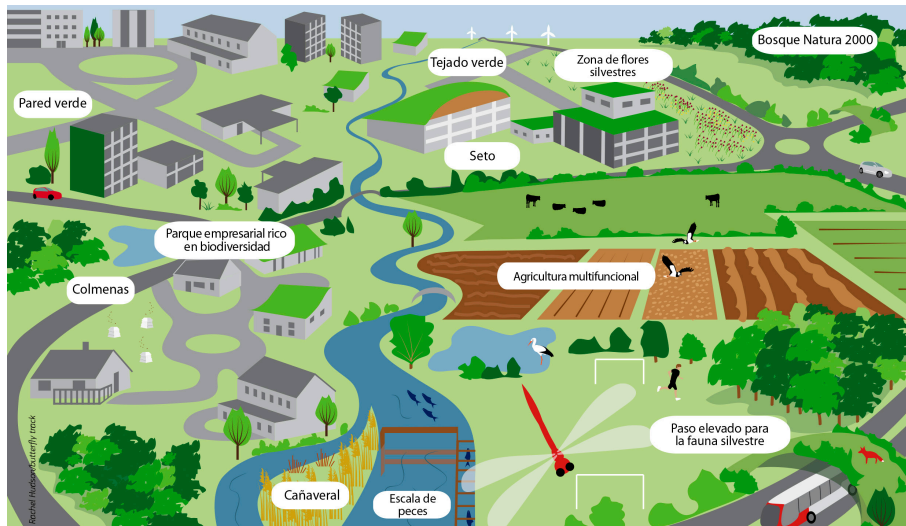


Figura 2.19. Posibles elementos de la Infraestructura Verde.

ELEMENTOS DE LA INFRAESTRUCTURA VERDE	1*	2	3	4
Red Natura 2000 y otras áreas de especial protección.				
Áreas de alto valor para la biodiversidad y la salud de los ecosistemas: áreas de inundación, humedales, pastizales, bosques, áreas costeras y vegetación de ribera				
Áreas naturales o con vida silvestre no protegidas de interés para mantener, proteger o incluso restaurar.				
Corredores ecológicos: lineales, trampolines o corredores paisajísticos.				
Corredores y anillos verdes.				
Ecoductos y puentes verdes.				
Escalas, pasos o vías para peces.				
Búfer ecológico.				
Paisajes y ecosistemas restaurados.				
Elementos urbanos: parques, jardines, zonas verdes residenciales, áreas deportivas permeables, cubiertas ajardinadas, muros verdes, parcelas, estanques, canales, lagos, etc.				
Suelos con sistemas agroforestales sostenibles.				
Arbolado urbano, plantaciones y suelos que pueden capturar CO <sub>2</sub> del aire y secuestrar carbono.				
Sistemas de drenaje sostenible y cubiertas ajardinadas.				
Pavimentos permeables de materiales drenantes.				
Pistas ciclistas y red de senderos para promover la buena salud física.				

- \* 1. Proteger el estado de los ecosistemas y la biodiversidad.
- 2. Mejorar el funcionamiento de los ecosistemas y promover sus servicios.
- 3. Promover el bienestar social y la salud de las personas.
- 4. Sostener el desarrollo de la economía verde y la gestión sostenible del territorio y el agua.

Tabla 2.4. Posibles elementos de la Infraestructura Verde y funciones.



*Natura 2000*, que aparece en la tabla 2.4, es la base de la Infraestructura Verde de Europa. Consiste en la creación de una red de zonas protegidas integrando todos los estados miembros de la Unión Europea (UE)<sup>132</sup>, de la que forman parte espacios de gran importancia ambiental en España como el anillo verde de Vitoria-Gasteiz<sup>133</sup> (Vitoria, España) o L'Albufera<sup>134</sup> (València, España). Experiencias como esta demuestran que la inversión en la conexión de espacios verdes puede contribuir a recuperar la economía europea fomentando enfoques innovadores y creando nuevas oportunidades de negocio y nuevos empleos ecológicos (este tipo de empleos ya representan alrededor del 5 % del mercado laboral europeo)<sup>135</sup>.

Las principales estrategias que se plantean respecto a la Infraestructura Verde y la recuperación y cuidado del aspecto ambiental de la sostenibilidad en Europa, a parte del proyecto *Natura 2000*, son las siguientes:

- **Infraestructura verde: mejora del capital natural de Europa**<sup>136</sup>. Aprobada en mayo de 2013. En este caso, la Comisión Europea pretende promover el desarrollo de una Infraestructura Verde en las áreas urbanas y rurales de la UE, valorando de manera positiva que la integración de los procesos naturales forme parte de la ordenación territorial.
- **Agenda Europa 2030**<sup>137</sup>. Aprobada en 2015, promueve, a través de los ODS, la consecución de una sociedad sostenible considerando no solo los aspectos económicos y sociales, sino también desde un punto de vista ambiental.
- **Pacto Verde Europeo**<sup>138</sup>. Presentado en 2019, busca conseguir que para 2050 las emisiones netas de GEI sean nulas y el crecimiento económico no dependa del consumo de recursos naturales mediante una economía limpia y circular, capaz de minimizar al máximo la contaminación y maximizar la recuperación ambiental.
- **Estrategia sobre la Biodiversidad de la UE para 2030**<sup>139</sup>. Publicadas en 2020, se busca aumentar la resiliencia de la sociedad frente a amenazas como los efectos del cambio climático o los brotes de enfermedades. Se establece la ampliación de zonas pertenecientes a la red *Natura 2000* y la restauración de la naturaleza y ecosistemas degradados.

En España no existe una herramienta de planificación, a nivel nacional, que resulte útil para la creación de una Infraestructura Verde<sup>140</sup>. Históricamente, los primeros elementos verdes que se conciben en España con la función de estructurar la ciudad son los anillos verdes, que a partir de los años 40 y 50 del siglo XX tratan de frenar el crecimiento disperso y la urbanización continua<sup>141</sup>. Uno de los ejemplos más importantes, y que como se ha mencionado también forma parte de la red *Natura 2000*, es el anillo verde de Vitoria-Gasteiz, proyecto desarrollado en la década de 1990 para restaurar la periferia de esta ciudad, aportando un alto valor no solo ambiental, sino también social y económico a este entorno anteriormente degradado<sup>142</sup>. A partir de anillos como este, se evolucionó hacia la creación de cuñas de entrada del elemento verde a la ciudad para conseguir un buen funcionamiento de la red mediante un sistema de nodos interconectados, con la creación de parques urbanos, zonas deportivas, corredores verdes o el desarrollo de sendas e itinerarios de movilidad sostenible para peatones y ciclistas.

La Comunidad Valenciana es pionera en la incorporación de conceptos de Infraestructura Verde como elemento de planificación regional y municipal. En el *Decreto 1/2011, de 13 de enero, del Consell, por el que se aprueba la Estrategia Territorial de la Comunitat Valenciana* se busca la conectividad de los espacios ver-

132 Comisión Europea. 2014.

133 Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2022.

134 Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica. 2022.

135 Comisión Europea. 2014.

136 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

137 Comisión Europea. 2022a.

138 Comisión Europea. 2022b.

139 Comisión Europea. 2022c.

140 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

141 *Ibidem*.

142 Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz. 2022.



des de las ciudades con los de su entorno rural<sup>143</sup>. La incorporación de forma completa de la Infraestructura Verde en la comunidad se consiguió con la *Ley 5/2014, de 25 de julio, de la Generalitat, de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje, de la Comunitat Valenciana*<sup>144</sup>.

En Barcelona se han planteado en los últimos años proyectos para la renaturalización de la ciudad, como la iniciativa del Ayuntamiento de Barcelona de *Cobertes Verdes* y el *Programa de Impulso de Infraestructura Verde Urbana*<sup>145</sup>. El ayuntamiento de la ciudad plantea el aumento del área verde de la ciudad para mejorar la calidad de vida de la ciudadanía mediante propuestas de introducción del elemento verde en cubiertas, fachadas, balcones o incluso en las superislas, ya que la trama urbana de Barcelona es densa y consolidada y no permite la previsión de espacios verdes a cota cero<sup>146</sup> (Figura 2.20).

En este plan el ayuntamiento pretende alcanzar “una infraestructura verde que ofrezca los máximos servicios ecosistémicos en una ciudad donde naturaleza y urbe interactúen y se potencien”, fomentando la consecución del *Compromiso de Barcelona por el Clima*, en el cual se fija el objetivo de alcanzar el objetivo, para el 2030, de un 1 metro cuadrado de verde urbano por cada habitante<sup>147</sup>.

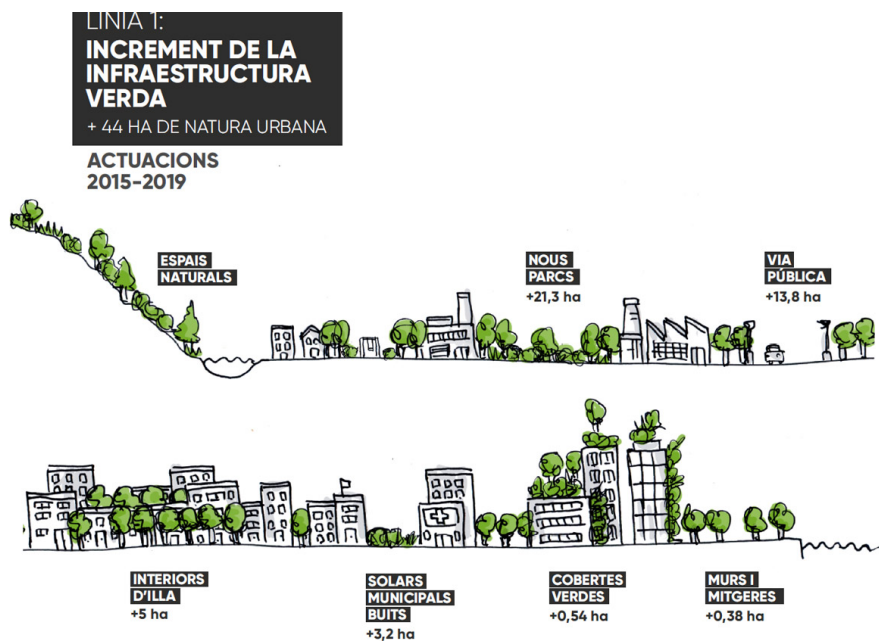


Figura 2.20. Programa de impulso a la Infraestructura Verde, Barcelona (España).

143 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

144 *Ibidem*.

145 *Sistemas de Cubiertas Vegetales*. 2018.

146 Ayuntamiento de Barcelona. 2022.

147 *Ibidem*.



## 2.4 LA CUBIERTA AJARDINADA

Las cubiertas ajardinadas son herramientas propias de la arquitectura sostenible capaces de conseguir la renaturalización de la ciudad, creando un entorno más sano en el que desarrollar las actividades diarias de los usuarios de la urbe, y por lo tanto, son susceptibles de formar parte de la Infraestructura Verde.

Una de las definiciones más completas del concepto de cubierta ajardinada es la realizada por Sutton en el libro *Green Roof Ecosystems*: “Las cubiertas verdes modernas [green roofs], también conocidas como cubiertas vegetales [vegetated green roofs] o *ecoroofs*, son algo aislado, nuevo, fragmentos de hábitat de origen antropogénico que consisten en membranas, substrato diseñado (el medio de cultivo) y conjunto de plantas, todo colocado encima de edificios u otras estructuras. El escaso espesor de sus capas y la altura respecto a la superficie de la tierra produce una importante exposición al viento, creando un inusual nicho con algunas similitudes potenciales con el entorno natural. [Las cubiertas ajardinadas] reciben una intensa radiación solar y precipitaciones variable, pudiendo instalar o no un sistema de riego. Las cubiertas verdes han aparecido debido al avance en el campo de los materiales de construcción, las técnicas de diseño y las ideas emergentes sobre cómo construir un entorno más sostenible y humano” (trad. a)<sup>148</sup>.

En las ciudades actuales, las cubiertas han terminado convirtiéndose en la sala de máquinas de la arquitectura residencial y de servicios. Las instalaciones de los edificios han ido aumentando en cantidad y tamaño desde principios del siglo XX hasta la actualidad, y la mayoría de los equipos necesarios para sustentar la arquitectura que hemos desarrollado en las últimas décadas se han tratado de esconder en la cubierta<sup>149</sup>. Anidan en las cubiertas toda una red de conductos y estructuras auxiliares (como paneles solares, antenas, etc.)<sup>150</sup>, que circulando por los edificios tratan de conectar el espacio habitable con los equipos de la cubierta.

El nuevo concepto de diseño sostenible de la arquitectura y el planeamiento urbano pretende conseguir la reconciliación de la estructura urbana con el individuo, mejorando su relación como colectivo y con la naturaleza<sup>151</sup>. Sabiendo que en el modelo de ciudad actual las cubiertas son entorno al 20-25 % de la superficie total urbana<sup>152</sup>, y que han terminado convirtiéndose en la periferia en altura de las ciudades<sup>153</sup>, llenas de enseres viejos y máquinas que acaparan el espacio y generan un ruido que impide cualquier disfrute de la cubierta<sup>154</sup>, parece claro que una de las principales herramientas para mejorar las condiciones de los habitantes, desde un punto de vista visual y térmico, se encuentra en el tratamiento de las cubiertas. Además, una integración de las cubiertas ajardinadas en la Infraestructura Verde de la ciudad puede permitir recuperar la percepción de escala urbana de la ciudad<sup>155</sup>.

Actualmente, las cubiertas planas transitables pueden tener varios usos, tanto desde el punto de vista funcional (introducción de la horticultura, almacenamiento, disposición de instalaciones, etc.) como desde el punto de vista recreativo (espacio para tomar el sol, leer, realizar reuniones sociales, hacer deporte, jugar, etc.)<sup>156</sup>. La intención actual con las cubiertas ajardinadas es introducir una dimensión ecológica en su aplicación, con nuevos usos como el enfriamiento urbano, el aislamiento térmico, la captación de CO<sub>2</sub> o la creación de espacio de vida natural adicional<sup>157</sup>; al mismo tiempo que se refuerzan otros usos ya extendidos en las cubiertas como la captación de energía solar o el almacenamiento de agua en sistemas de cubierta aljibe.

El *Rooftop Catalogue*, de la mano del estudio de arquitectura y urbanismo MVRDV y la organización *Rotterdamse Dakendagen*, con la ayuda de la institución pública de la ciudad de Róterdam (Países Bajos),

148 Sutton, R.K. 2015.

149 Tectónica. 2011.

150 Ibídem.

151 Martínez, C.E. 2006.

152 Cascone, S. 2019.

153 Llopis, M.T. 2010.

154 Martínez, A. 2005.

155 Martínez, C.E. 2006.

156 Ajuntament de Barcelona. 2015.

157 Van der Meulen, S.H. 2019.





pretende hacer visibles estas posibilidades de las cubiertas<sup>158</sup>. En Róterdam existen 18,5 km<sup>2</sup> de cubiertas planas con posibilidades de uso, mientras que en toda la extensión de Países Bajos hay, aproximadamente, 600 km<sup>2</sup> de cubiertas planas que pueden ayudar a diversificar la ciudad, combinar usos, fomentar la convivencia y ayudar a mejorar las condiciones ambientales y climáticas de la ciudad y el planeta. En el catálogo se ofrecen más de 130 propuestas diferentes de usos para las cubiertas, valorando los beneficios ambientales, funcionales y económicos desde perspectivas variadas. Las propuestas de cubierta no solo se centran en la generación de espacios verdes y sostenibles (almacenamiento de agua, captación de energía solar, etc.), sino también como espacios culturales, de interacción, deportivos, etc. Se da así a la ciudad la posibilidad de crecer en altura, pero de manera sostenible y equilibrada, creando lugares para aquellos usos que en la cota cero de la ciudad han quedado sin espacio pero que, más allá de una vivienda y una oficina, son los que convierten la ciudad en un espacio sano, sostenible y con proyección de futuro. Además, se aporta una visión más realista, realizando un estudio del peso que supondría la aplicación de las principales cubiertas planteadas, al igual que se acota en que tipologías de edificio sería más adecuado realizarlas. Así, este catálogo puede servir como guía real, evitando quedar en ideas fantásticas que no se lleguen a llevar a cabo. Y poco a poco las azoteas se irán repoblando y se unirán a los más de 200 000 m<sup>2</sup> de cubiertas ajardinadas que se han instalado en la ciudad desde 2008, como el *DakAkker* (conocido como *Roof Farm*) (Figura 2.21). Se trata de una conocida cubierta ajardinada en la ciudad de Róterdam, de unos 1000 m<sup>2</sup>, que se desarrolla como espacio para el cultivo de vegetales, la apicultura, el almacenamiento de agua y la interacción y socialización, además de asegurar beneficios climáticos como la reducción de las inundaciones y la mejora de la eficiencia energética del edificio<sup>159</sup>.

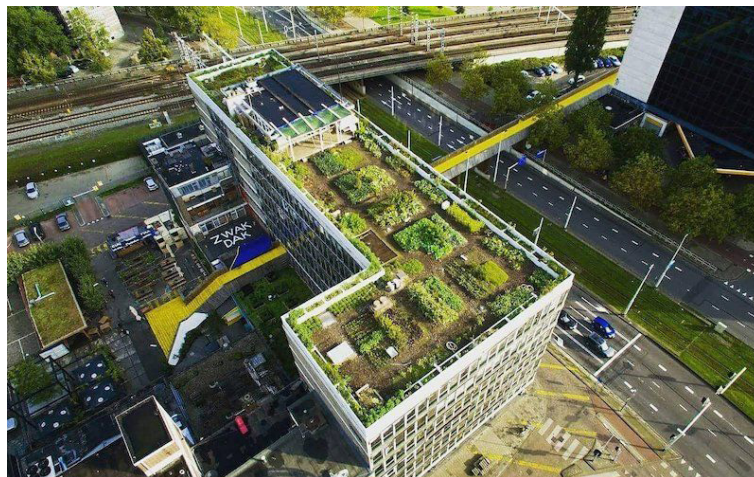


Figura 2.21. *DakAkker*, en Róterdam (Países Bajos).

Azoteas como esta combinan los beneficios funcionales, recreativos y ecológicos de las cubiertas, consiguiendo que las mejoras de implantación de una cubierta ajardinada afecten a una mayor cantidad de niveles dentro de la estructura de la sociedad, como por ejemplo la eficiencia energética, la mejora acústica, la mejora de la calidad del aire, la mejora de aspectos ambientales y de entorno (tanto estéticos como psicológicos)<sup>160</sup> o la ampliación de las posibilidades de socialización y mejora del sentimiento colectivo de los usuarios de la ciudad. La mejora de las condiciones de aislamiento, enfriamiento urbano, desarrollo de la biodiversidad, calidad del aire y confort interior de los edificios se traduce como una mejora tanto a nivel privado como público, tanto a nivel de edificio como de ciudad, tanto a nivel microclimático como a nivel global del planeta<sup>161</sup>. El uso de cubiertas ajardinadas permite, por lo tanto y entre otros, reducir las variaciones diarias de temperatura en la superficie exterior y en el aire interior de las estancias bajo ellas, aumentar el aislamiento acústico amortiguando el ruido urbano, reducir la escorrentía de agua de lluvia y los riesgos de inundaciones y mejorar en la calidad del aire y del agua<sup>162</sup>.

158 MVRDV. 2021.

159 DakAkker. 2019; Estévez, R. 2019.

160 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., et al. 2017.

161 Van der Meulen, S.H. 2019.

162 Cascone, S. 2019.



Cabe destacar que, a nivel ambiental y financiero (especialmente desde un punto de vista de costes de construcción y mantenimiento), los árboles en el espacio urbano tienen una influencia mayor que la cubierta ajardinada en la mejora de estos factores mencionados en el párrafo anterior, pero la cubierta permite complementar la vegetación a cota cero de la ciudad, especialmente en los casos de lugares muy densificados y en los cuales es difícil el uso de suelo para la integración de espacios naturales<sup>163</sup>.

En este campo de las cubiertas ajardinadas, las investigaciones sobre sus propiedades, comportamiento e implantación urbana se han desarrollado principalmente en Estados Unidos, Australia y algunos países europeos y asiáticos. La mayoría de las investigaciones, en torno al 66 %, se han llevado a cabo en Estados Unidos y Europa<sup>164</sup>. Uno de los ejemplos de aplicación más eficaces de las cubiertas ajardinadas se ha realizado en Corea del Sur<sup>165</sup>. Desde el gobierno de la capital, Seúl, se han impulsado desde 2002 proyectos para fomentar la creación de cubiertas ajardinadas, en parte debido a que el 46 % del área urbanizada total de la ciudad corresponde a azoteas susceptibles de convertirse en espacios naturales, lo que implicaría unos 55 km<sup>2</sup> de cubiertas ajardinadas. Entre 2002 y 2013, tanto en edificios públicos como en privados, se crearon 661 cubiertas ajardinadas<sup>166</sup>, entre las que se encuentran proyectos como la cubierta de la *Seoul Library* (Figura 2.22) o del *Korea UNESCO Center*.



Figura 2.22. Cubierta ajardinada en la *Seoul Library*, Seúl (Corea del Sur).

En el caso de Corea del Sur, el fomento desde la administración pública de la implementación de las cubiertas ajardinadas se ha fomentado sobre la reducción de escorrentía de agua de lluvia y de temperatura de la superficie de la cubierta, aunque se ha observado una disminución de la calidad de agua de escorrentía con el paso del tiempo, probablemente debido al uso de fertilizantes<sup>167</sup>. Por lo tanto, con esto se demuestra que es necesario una ampliación en los campos de investigación y en el desarrollo de estudios sobre cubiertas más antiguas y/o durante periodos más largos, al mismo tiempo que se muestra necesario que la información y las conclusiones derivadas de estas investigaciones lleguen a la sociedad, animándola a emplear cubiertas ajardinadas, concienciando sobre sus beneficios y educando para el mantenimiento de estas.

#### 2.4.1 Tipos de cubiertas ajardinadas

Tras una breve introducción a las cubiertas ajardinadas y su potencial como herramienta de la arquitectura sostenible y elemento de la Infraestructura Verde, cabe definir las como sistema constructivo propio de

163 Shin, E., Kim, H. 2019.

164 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

165 Ibídem.

166 Seoul Solution. 2017.

167 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.



la envolvente de un edificio. Se clasifican en tres modelos de cubierta ajardinada, definiendo cada uno de ellos unas características y propiedades visuales y estéticas diferentes.

En primer lugar, se debe diferenciar el tipo de cubierta de acuerdo con el sistema constructivo del propio del sistema multicapa, es decir, al orden relativo que mantiene las diferentes capas entre sí. La diferencia central entre los sistemas que se van a mencionar es la posición del aislamiento térmico y la lámina impermeable, y/o la existencia de cámara de aire.

- **Cubierta convencional:** denominada así al tratarse del sistema más empleado históricamente. En este caso, el aislamiento térmico se coloca sobre el forjado o estructura resistente, o si corresponde, sobre el hormigón de pendientes. La lámina impermeable, con las prestaciones adecuadas si va a quedar expuesta al exterior, se coloca sobre el aislamiento térmico. Se debe prestar una atención especial a la compatibilidad química entre ambos materiales, especialmente en el caso de que la lámina impermeable vaya adherida. Dentro de este tipo de cubiertas podemos diferenciar, a su vez, entre la cubierta convencional no ventilada y la ventilada<sup>168</sup>.
- **Cubierta convencional no ventilada,** o sin cámara de aire. En este caso, al no disponer de una cámara de aire donde se pueda disipar el vapor de agua se recomienda que se instale una barrera de vapor en la cara caliente del aislamiento. El vapor de agua del interior asciende por la estructura de la cubierta y al llegar a la cara fría del aislamiento térmico, donde se produce el mayor gradiente de temperatura entre sus capas, se condensa. Debido a que en este caso la lámina impermeable se sitúa por encima del aislamiento térmico, la barrera de vapor es necesaria para impedir que el vapor llegue a la cara fría del aislante, su paso quede impedido por la lámina impermeable y se condense, entrando de nuevo a la vivienda y produciendo humedades (Figura 2.23).

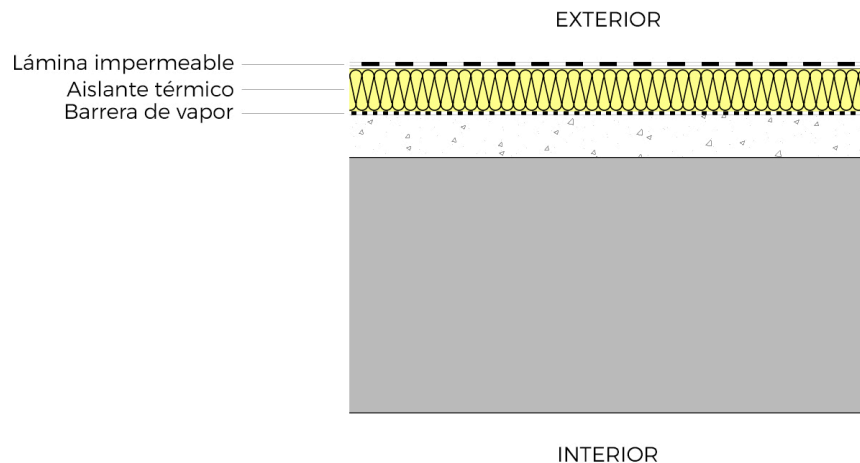


Figura 2.23. Cubierta convencional no ventilada.

- **Cubierta convencional ventilada,** o con cámara de aire. En este caso se evita la condensación con la disposición de una cámara de aire bajo la lámina impermeable, normalmente soportada por tabiques de soporte en el caso de cubiertas planas, con rejillas que permitan la renovación del aire en su interior y disipar el vapor de agua.
- **Cubierta invertida:** recibe este nombre al invertir el orden *convencional* entre la lámina impermeable y el aislamiento térmico. En este caso, el sistema constructivo es similar a la cubierta convencional pero el aislamiento térmico se coloca por encima de la lámina impermeable, protegiéndola de los agentes atmosféricos y reduciendo considerablemente los gradientes de temperatura diarios y anuales en su superficie, por lo que aumenta su durabilidad (Figura 2.24). En este caso, la propia lámina impermeable ya hace funciones de barrera de vapor. Cabe destacar que los materiales aislantes empleados en este sistema deben poder mojarse sin perder sus propiedades y sin peligro de degradación química o física.

168 Zimmermann, A. 2015.

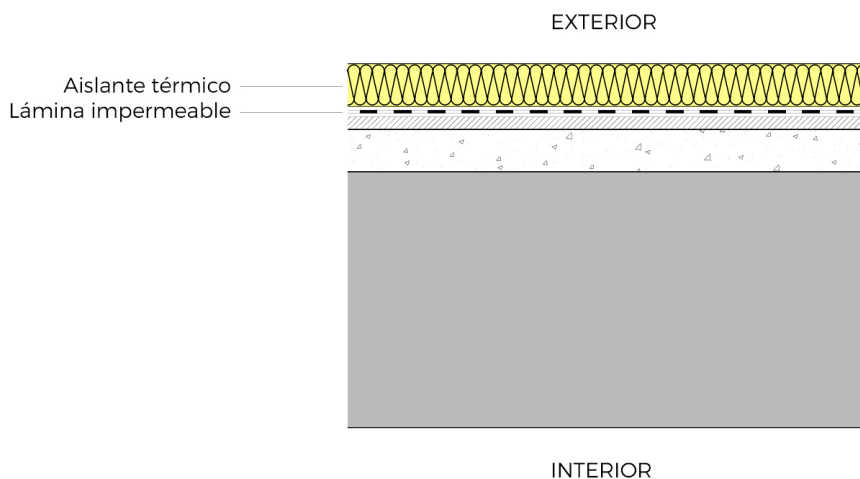


Figura 2.24. Cubierta invertida.

En el caso de la aplicación de cualquiera de estos sistemas para cubiertas ajardinadas se debe mencionar que el aislamiento térmico, tanto en las cubiertas convencionales como invertidas, debe tener una resistencia adecuada para soportar las cargas sobre él. En el caso de las cubiertas convencionales ventiladas, debido a su subestructura de tabiques de soporte, se recomienda el uso de cubiertas ajardinadas de poco espesor, aunque este sistema constructivo se encuentra ya en desuso<sup>169</sup>. En las investigaciones llevadas a cabo en esta tesis se tomará como sistema constructivo de referencia la cubierta invertida, ya que con ella se consigue una mayor durabilidad y mejor comportamiento de la capa de mayor importancia en una cubierta, la lámina impermeable.

En cuanto a los tres modelos propios de sistema ajardinado, según la guía de la FLL<sup>170</sup>, se diferencian tres tipos de cubierta: **extensivas**, **semiintensivas** e **intensivas**.

Otra clasificación, aunque menos común, diferencia cuatro sistemas de cubierta ajardinada: intensivas (substrato con espesores mayores a 30 cm), semiintensivas (substrato con espesores entre 15-30 cm), extensivas *multi-course* (substratos con espesores comprendidos entre 10-15 cm) y extensiva *single-course* (substratos con espesores comprendidos entre 7-15 cm)<sup>171</sup>. En la presente tesis emplearemos la clasificación propuesta por la guía de la FLL y la norma NTJ 11C<sup>172</sup> (*Normas Tecnológicas de Jardinería y paisajismo. Ajar-dinamientos especiales. Cubiertas verdes*), ya que es la más aceptada.

#### 2.4.1.1 Cubiertas extensivas

Estas cubiertas reciben el nombre de *extensivas* debido a que se pretende que sea el sistema más ampliamente difundido en su aplicación por su bajo coste, bajo mantenimiento y el uso de vegetación local<sup>173</sup>.

Se trata de cubiertas de poco espesor y peso. En concreto, el espesor de la capa de sustrato se sitúa entre 8 y 15 cm<sup>174</sup> (Figura 2.25), siendo su ligereza un factor atrayente para su uso en la rehabilitación de edificios sin necesidad, a priori, de reforzar la estructura<sup>175</sup>, ya que su instalación supone una carga de entre 60-180 kg/m<sup>2</sup><sup>176</sup>, considerando la cubierta en estado de saturación de agua<sup>177</sup> (aunque siempre se debe

169 Zimmermann, A. 2015.

170 Landscape Development and Landscaping Research Society e. V. (FLL). 2018.

171 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

172 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

173 Sutton, R.K. 2015.

174 Ajuntament de Barcelona. 2015.

175 Cascone, S. 2019.

176 La norma NTJ 11C aporta los valores en daN/m<sup>2</sup>, pero se considera equivalente a un peso en kg/m<sup>2</sup>, pero destacando que se ha realizado un redondeo de la aceleración de la gravedad de 9,80665 a 10 m/s<sup>2</sup>.

177 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.



realizar un estudio del estado del edificio antes de actuar constructiva o estructuralmente sobre él). A parte del peso propio del sistema de cubierta, se deberá tener en cuenta, para cualquiera de los tres sistemas de cubierta ajardinada, que en función de su funcionalidad la cubierta soportará una sobrecarga de uso diferente (véase tabla 3.1).

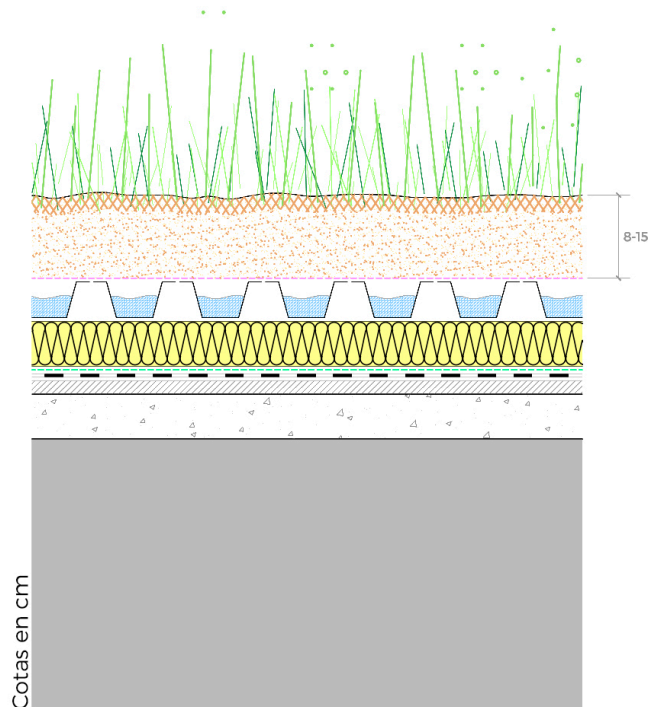


Figura 2.25. Cubierta ajardinada extensiva.

Las cubiertas extensivas no necesitan, por lo general, de la integración de un sistema de riego (pero sí de la instalación de, al menos, una toma de agua en la cubierta, para el riego manual<sup>178</sup>) ni un excesivo mantenimiento, especialmente debido al tipo de vegetación, con pocas necesidades de cuidados, aporte de fertilizantes y de agua. En concreto, las necesidades de mantenimiento dependerán, además del tipo de vegetación, de las condiciones climáticas, el tipo de sustrato y el método de construcción empleado, pero, por lo general, el esfuerzo empleado en la producción y mantenimiento de este tipo de cubierta es más bajo que en cualquier de los otros dos sistemas<sup>179</sup>.

Respecto a las especies vegetales adecuadas para instalar en este tipo de cubiertas deben requerir un mínimo aporte de humedad y fertilizantes, asegurar un elevado poder de cobertura, un crecimiento controlado<sup>180</sup>, tanto en su parte aérea como enterrada, y una alta capacidad de adaptación a condiciones extremas y de regeneración<sup>181</sup>. El principal propósito de este tipo de cubiertas es conseguir un buen desarrollo de la vegetación a corto plazo, una mayor biodiversidad, cobertura de la vegetación, y el establecimiento permanente de fauna que pueda ayudar a la dinámica del ecosistema<sup>182</sup>. Se recomienda el uso de especies vegetales locales, ya acostumbradas a las condiciones climáticas del lugar (para el clima mediterráneo, véase apartado 4.2.6).

Este sistema se puede instalar en cualquier pendiente<sup>183</sup>, hasta del 100 % (45 °), de acuerdo con las limitaciones y restricciones indicadas en el apartado 4.2.1. En cualquier caso, tanto este sistema como el semi-intensivo y el intensivo deben tener pendientes mayores al 2 % para asegurar el correcto drenaje del agua<sup>184</sup>.

178 Zimmermann, A. 2015.

179 FLL. 2018.

180 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

181 FLL. 2018.

182 Ibídem.

183 Cascone, S. 2019.

184 FLL. 2018.



En el caso de instalarse en cubiertas planas, este sistema no suele ser transitable, debido a las limitaciones de carga de la estructura, pero sí accesible para su mantenimiento<sup>185</sup>.

Se estima que el coste aproximado de instalación, por metro cuadrado, de una cubierta ajardinada extensiva es de 70-90 €/m<sup>2</sup>, incluyendo la lámina impermeable, el sistema drenante, el sustrato, la vegetación y el sistema de riego, en caso de ser necesario<sup>186</sup>.

El sistema extensivo es técnicamente más simple en su instalación y es adecuado para cubiertas de gran tamaño, pero respecto a las cuestiones referentes al control de agua de escorrentía y al comportamiento energético, los beneficios medio ambientales obtenidos son menos relevantes que en los sistemas intensivos<sup>187</sup>. En definitiva, son sistemas que, correctamente diseñados, permiten mejorar el comportamiento energético y térmico de la cubierta en comparación con otros sistemas no ajardinados (como las cubiertas con acabado de grava o rasilla) mientras que la vegetación funciona correctamente con poco espesor de sustrato. Su uso está más extendido debido a las menores limitaciones de peso y coste, en comparación con los sistemas semiintensivos o intensivos, aunque se debe considerar siempre que, a pesar del poco espesor, es una cubierta capaz de almacenar agua, por lo que el diseño de la impermeabilización de la cubierta y el cálculo del peso se realizarán de acuerdo a esta premisa.

#### **2.4.1.2 Cubiertas semiintensivas**

Este sistema es muy similar a la cubierta ajardinada extensiva, pero con espesores de sustrato mayores, situados entre 15 cm y 30 cm<sup>188</sup> (Figura 2.26). Tanto el coste, como el mantenimiento y el peso de la cubierta son mayores, pero sin llegar a los valores de las cubiertas intensivas. El coste aproximado es de 90-130 €/m<sup>2</sup>, incluyendo las mismas capas descritas anteriormente (lámina impermeable, sistema de drenaje, sustrato, vegetación y riego, en caso de ser necesario), y el peso sobre la estructura portante aumenta debido al mayor espesor de sustrato, situándose en torno a 150-350 kg/m<sup>2</sup>, en condiciones de saturación<sup>189</sup>.

En el caso de su uso en rehabilitación, a priori puede necesitar de un refuerzo de la estructura, aunque como en todos los casos se debe estudiar cuidadosamente la capacidad portante de la estructura antes de concluir ninguna intervención. En estos sistemas suele ser ya más común que la cubierta sea transitable, por lo que se deberá considerar este factor también en la sobrecarga de uso de la estructura. En caso de ser transitable, se instalarán zonas de vegetación combinadas con zonas de pavimento (para no pisar sobre el sustrato y compactar la tierra, limitando su capacidad de almacenamiento de agua y aire). En caso de no ser transitable, siempre debe ser accesible para trabajos de mantenimiento.

El mantenimiento en este sistema de cubiertas es similar al de las cubiertas extensivas, pero depende en mayor medida del tipo de vegetación empleada. Por ejemplo, en el caso de que se instalen arbustos de pequeño porte, también serán necesarios trabajos de poda y recorte<sup>190</sup>. En estas cubiertas, igual que ocurrirá en las cubiertas ajardinadas intensivas, los trabajos de mantenimiento para evitar la invasión de malas hierbas son los más importantes y que conllevan un mayor gasto de tiempo<sup>191</sup>.

Pese a poder emplear más especies vegetales, y que las limitaciones de agua y nutrientes no son tantas como en las cubiertas extensivas, la vegetación empleada debe requerir el mínimo mantenimiento, aporte de agua y de nutrientes posible<sup>192</sup>. Se trata de cubiertas ajardinadas que permiten el desarrollo de vegetación de mayor porte, sin llegar a árboles o palmeras. Esto, unido al mayor espesor del sustrato, y por lo tanto mayor capacidad de almacenamiento de agua, hace de este sistema una mejor solución medioambiental

185 Cruz, A.I. 2017.

186 Ajuntament de Barcelona. 2015.

187 Cascone, S. 2019.

188 Ajuntament de Barcelona. 2015.

189 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

190 Ajuntament de Barcelona. 2015.

191 FLL. 2018.

192 Ibídem.



(reducción de agua de escorrentía, captación de CO<sub>2</sub>, reducción de la temperatura ambiental, etc.). Aun así, no se debe perder nunca de vista el mayor coste y peso en comparación con la solución extensiva.

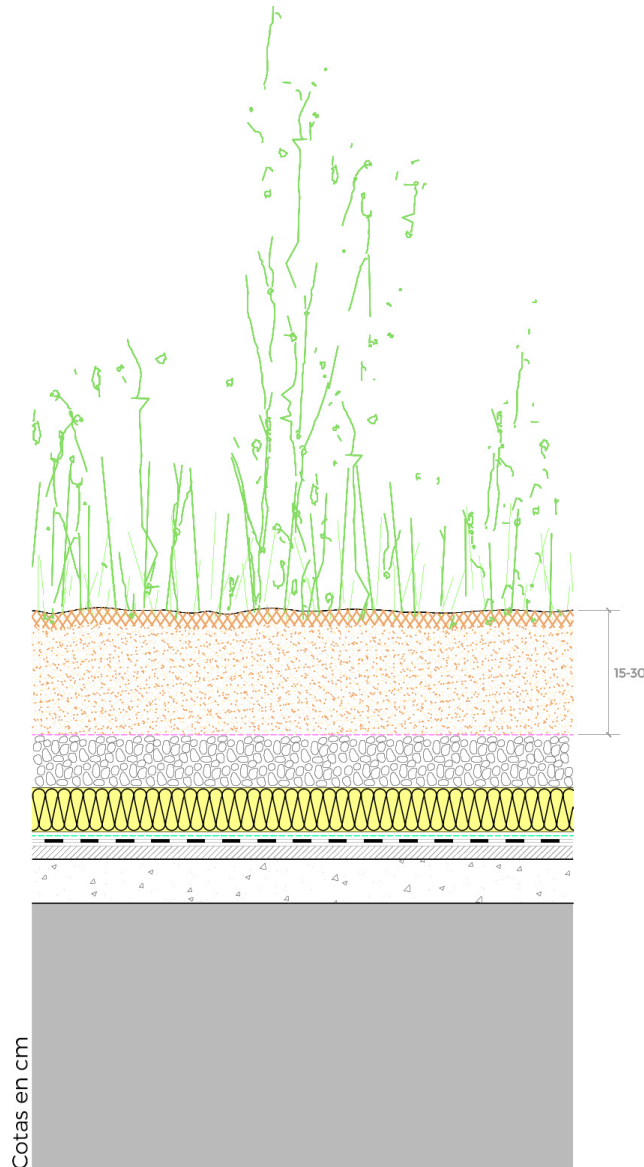


Figura 2.26. Cubierta ajardinada semiintensiva.

### 2.4.1.3 Cubiertas intensivas

En este caso, el nombre de *intensivas* se debe a los requerimientos de mantenimiento, aporte de agua y de nutrientes, mucho más intensivos y regulares que en el caso de las cubiertas extensivas o semiintensivas.

El espesor del sustrato tiene rangos mucho más amplios, situándose entre los 30 cm y los 100 cm<sup>193</sup>, aunque en casos puntuales puede llegar a los 200 cm (Figura 2.27). No obstante, lo habitual son espesores cercanos a los 60 cm<sup>194</sup>. Debido a estos mayores espesores, y a que las especies vegetales a instalar son de mayor porte, la carga que se añade a la estructura portante es de más de 600 kg/m<sup>2</sup>, en condiciones de saturación<sup>195</sup>, por lo que no suelen ser sistemas adecuados en el caso de rehabilitaciones de edificios antiguos, ya que, a prior, van a necesitar un refuerzo de la estructura. En el caso de instalar el sistema intensivo en un edificio de nueva planta resulta muy importante tener en cuenta su carga desde un principio, debido a su

193 Ajuntament de Barcelona. 2015.

194 Cruz, A.I. 2017.

195 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.



mayor peso que los sistemas extensivo y semiintensivo, para dimensionar de manera adecuada la estructura portante de la cubierta, aunque para cualquiera de los tipos de ajardinamiento mencionados se debe realizar un estudio de cargas previo al dimensionado de la estructura.

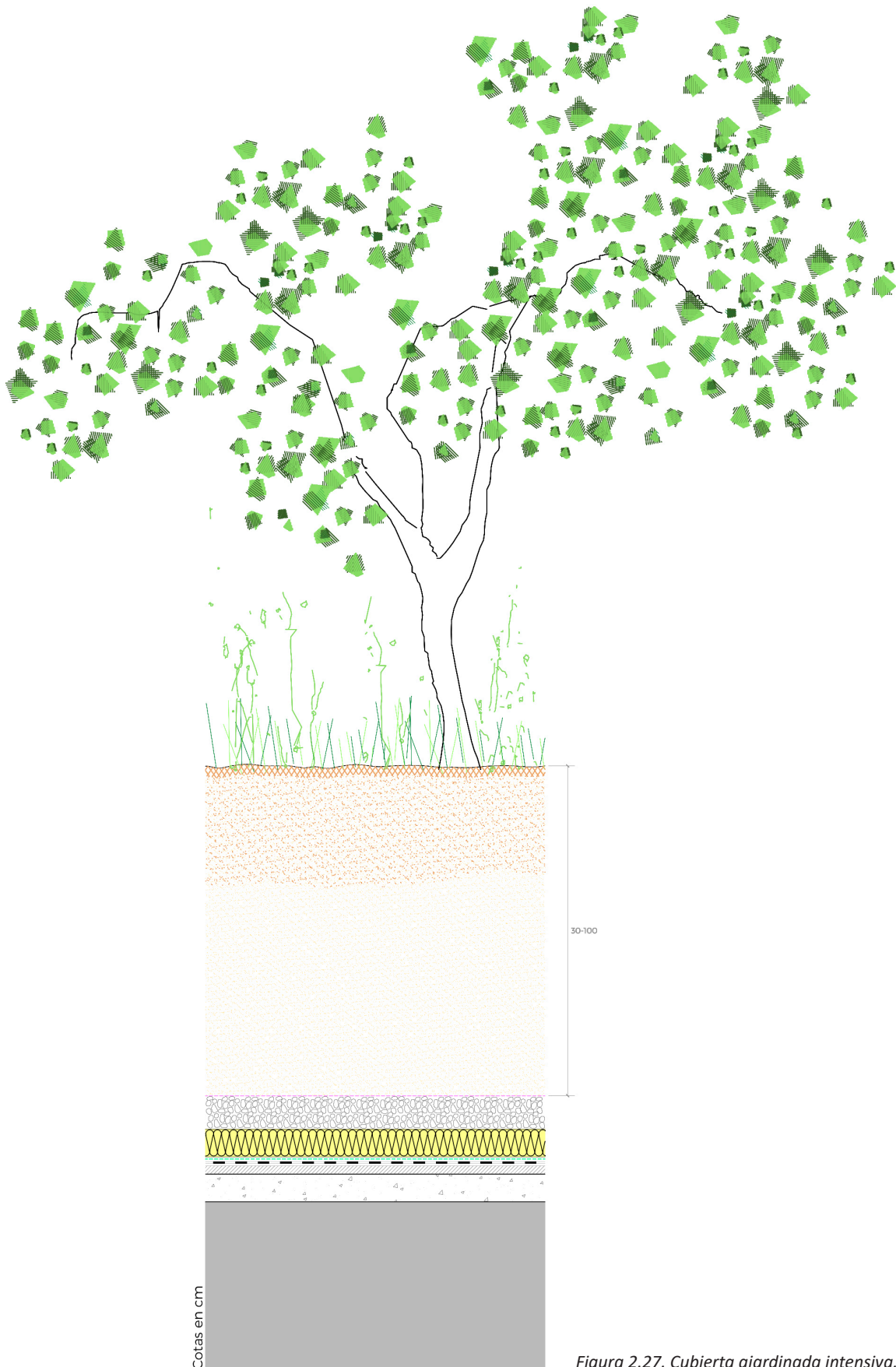


Figura 2.27. Cubierta ajardinada intensiva.





El coste de estos sistemas también es mayor, superando los 150 €/m<sup>2</sup>, aunque varían en función del diseño y los posibles usos de la cubierta, ya que este tipo de cubiertas se suelen diseñar como transitables con zonas y usos similares a los de un jardín (con instalación de láminas de agua, pérgolas y mobiliario, zonas de juego, huertos urbanos con almacenes para herramientas, etc.)<sup>196</sup>. Con la instalación de un sistema intensivo se mejora la biodiversidad<sup>197</sup> y se reproduce sobre la cubierta un espacio abierto de uso colectivo, similar a aquellos que se instalan en la cota cero<sup>198</sup>, pero sin consumo de suelo de la ciudad. Justamente debido a esta intención de que sea un espacio transitable y de disfrute de la comunidad, se suelen instalar en cubiertas con pendientes menores al 5 %, aparte de que, en sistemas con mayor pendiente, debido al rápido drenaje del agua por gravedad, combinado con las necesidades hídricas de las especies vegetales de este sistema, no suelen funcionar bien.

El mantenimiento requerido por el sistema de cubierta intensiva es más elevado, por la necesidad de control del riego, la aplicación de fertilizantes, las podas y retirada de malas hierbas, o, en el caso de que exista mobiliario, la limpieza y cuidado de este<sup>199</sup>. Pero, por otro lado, los beneficios derivados de su instalación son mayores: mayores reducciones de la escorrentía de agua de lluvia<sup>200</sup> (a mayor capacidad de absorción y retención de agua, el agua de lluvia que se drena al sistema de alcantarillado es menor) y menores ganancias y pérdidas de calor del interior del edificio, por lo que tienen un mejor comportamiento térmico e implica un mayor ahorro energético<sup>201</sup> (la presencia y cantidad de agua aumenta las propiedades térmicas al favorecer una mayor evapotranspiración del sistema) (véase apartado 3.1.2.1).

Debido al aporte regular de nutrientes y agua, con un mantenimiento controlado y unos espesores de sustrato mucho mayores, las especies vegetales a instalar en las cubiertas intensivas muestran pocas restricciones, pudiendo llegar a instalar arbustos de mayor porte o árboles. Las propiedades medio ambientales, las posibilidades de uso y su comportamiento térmico y energético son mejores, pero su peso y coste de construcción se constituyen como dos características muy restrictivas que limitan su uso.

#### **2.4.2 Historia y evolución de la cubierta plana ajardinada**

Una vez conocidos los tres sistemas de cubiertas ajardinadas que se van a tratar a lo largo de este estudio cabe destacar que, a pesar de que en algunos casos sean susceptibles de instalarse en cualquier pendiente (véase consideraciones particulares en apartado 4.2.1) se va a considerar su implantación en cubiertas planas (pendientes entre el 2 % y 5 %). En este caso, no se producirán problemas con el almacenamiento de agua en cubiertas intensivas, cuya vegetación necesita mayor aporte de nutrientes y humedad, así como se mantendrá la posibilidad de que las cubiertas sean accesibles para su uso privado o público, y no solo para mantenimiento.

Por lo tanto, centrándose el desarrollo de esta tesis a las cubiertas planas ajardinadas (aunque no de forma limitada), sean extensivas, semiintensivas o intensivas, cabe realizar una evolución histórica que contextualice la situación actual y como se ha alcanzado.

La asiduidad en el uso de las cubiertas planas como sistema constructivo seguro frente a la entrada de agua se consolidó a partir del Movimiento Moderno (1925-1965) con las estructuras de hormigón armado y la evolución de los sistemas de impermeabilización. Hasta ese momento el uso de las cubiertas planas venía condicionado siempre por las posibles filtraciones y humedades, estando su uso a la sombra de las cubiertas inclinadas con faldones de gran pendiente que permitían desalojar de manera rápida el agua de lluvia<sup>202</sup>.

196 Ajuntament de Barcelona. 2015; Zimmermann, A. 2015.

197 Cascone, S. 2019.

198 FLL. 2018.

199 Cascone, S. 2019.

200 Ibídem.

201 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

202 Instituto Valenciano de la Edificación (IVE). 2011.



Aun así, en climas cálidos y con escasas precipitaciones las cubiertas planas se empezaron a desarrollar desde los primeros ejemplos de arquitectura vernácula. Este es el caso, por ejemplo, de la antigua Mesopotamia, donde se empleaban cubiertas planas configuradas con capas de cañizo de palma, tela y tierra compactada sobre una estructura de vigas de madera, protegiéndose al exterior con un mortero de cal y barro armado con paja o pelo de palmera<sup>203</sup>. Es de estas primeras cubiertas de tierra compactada de las que permanece el nombre de **terraza** o **terrado**<sup>204</sup>. Es también en Mesopotamia donde se encuentra el ejemplo más emblemático y antiguo de cubierta plana ajardinada: los **Jardines Colgantes de Babilonia** (605-562 a.C.)<sup>205</sup>, que introducen el concepto de la vegetación en las terrazas, y no solo en la cota cero de la ciudad<sup>206</sup> (Figura 2.28).



Figura 2.28. Jardines colgantes de Babilonia (Mesopotamia).

Otro ejemplo de este uso de cubiertas ajardinadas en una época tan temprana se puede apreciar en la **Villa de los Misterios** (primera mitad del siglo II a.C.). En esta construcción de la ciudad de Pompeya (Italia), de clima cálido, aunque no tan severo como en el caso mencionado previamente, se observa un podio que funciona como cubierta de la planta baja y espacio exterior de las salas de la primera planta (Figura 2.29). Varias investigaciones han corroborado que en su superficie de cubierta se encontraba un jardín<sup>207</sup>.



Figura 2.29. Reconstrucción actual de la Villa de los Misterios (Pompeya, Italia).

El sistema con tierra compactada presentaba la ventaja de tener una gran inercia térmica<sup>208</sup> y un mínimo impacto sobre el ecosistema debido a la nula producción de residuos<sup>209</sup> (en la demolición la tierra volvía a

203 IVE. 2011.

204 Ramos, F. 1997.

205 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

206 Britto, C. 2001.

207 Martínez, A. 2005.

208 IVE. 2011.

209 Ramos, F. 1997.



la tierra), pero, como inconveniente, cabe destacar el elevado peso, especialmente si se humedecía el sistema<sup>210</sup> (en este caso además el aislamiento térmico propio de la capa de tierra disminuía). Estas características pueden ser las responsables de que este tipo de cubiertas no solo se emplearan en climas cálidos, sino también en climas con inviernos largos, severos y escasas precipitaciones. Un ejemplo lo podemos observar en la arquitectura vernácula del Ártico, donde las cubiertas se construyeron mediante una capa de tierra y ramas sobre una estructura de madera. La inercia térmica de la tierra protegía el interior de las viviendas, a la vez que las temperaturas que alcanzaba la superficie de la cubierta, por diferencial térmico debido al contacto con el interior más cálido, era menor que el de cualquier otro elemento del paisaje, evitando la congelación de la superficie y permitiendo la aparición de vegetación. Estos sistemas con la tierra como recurso básico en la construcción de la cubierta también fueron ampliamente desarrollados por los nómadas en las estepas de Asia Central<sup>211</sup>.

El uso de la tierra como elemento de construcción se apreció, no solo por su inercia térmica y su capacidad de mejorar las condiciones de confort en el interior de la vivienda, sino también por su capacidad de regular la humedad. En las construcciones más antiguas, como ya se ha mencionado, la capa de tierra compactada conformaba la propia cubierta, reforzada en muchas ocasiones por capas de cañizo, paja o mortero de cal. La tierra, por lo tanto, se encontraba en contacto directo con el exterior y el interior. Gracias a ello, cuando el ambiente interior se encontraba cargado de vapor de agua, la propia tierra podía absorber el exceso, evaporándolo luego al exterior y regulando la temperatura superficial externa de la cubierta. En cambio, en aquellas ocasiones que había una falta de vapor de agua en el interior de la vivienda la humedad almacenada en la tierra se liberaba hacia el interior<sup>212</sup>.

Ya en climas menos extremos, donde a pesar de las bajas temperaturas se produce mayor cantidad de precipitaciones anuales, como, por ejemplo, la zona central de Europa, la cubierta plana vernácula de tierra también se ha empleado, con menor asiduidad, pero con una aparición de vegetación espontánea en la superficie más prolifera gracias a las lluvias<sup>213</sup>. Este tipo de cubiertas se configuraban, al igual que los sistemas previamente mencionados, con estructura de madera, añadiendo sobre ella con capa de tierra, capa de vegetación acostada boca abajo y, sobre esta, otra capa de tierra y vegetación<sup>214</sup>.

La cubierta, tanto en la arquitectura vernácula como a lo largo de todo su desarrollo hasta la actualidad, es el elemento de la envolvente de un edificio más expuesto a los agentes climáticos<sup>215</sup>. Esta aparición espontánea de vegetación en los primeros ejemplos de cubiertas con tierra compactada aumentó la durabilidad de la cubierta, el confort interior (al introducir una nueva capa en el sistema de protección frente a fenómenos meteorológicos) y la cohesión y seguridad del sistema constructivo al emplear las raíces de la vegetación como elemento cohesivo de la capa de tierra<sup>216</sup>.

Poco a poco, la vegetación que aparecía de forma no controlada en las cubiertas empezó a considerarse un elemento diseñable y deseable debido en gran parte a su poder estético y su capacidad de aportar al espacio de cubierta otros usos lejos del abandono. A finales del siglo XV, Leonardo da Vinci propuso en el **Manuscrito de París**, escrito realizado para la reforma de Milán (1490), colocar el jardín de las villas urbanas en lo alto de podios sobre los espacios abovedados de las galerías de servicio<sup>217</sup> (Figura 2.30). En otros proyectos similares, planteó la colocación de este jardín sobre una galería longitudinal en la azotea que conectara varios espacios de la ciudad<sup>218</sup>.

---

210 IVE. 2011.

211 Jim, C.Y. 2017.

212 Ibídem.

213 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., et al. 2010.

214 Britto, C. 2001.

215 Lopez-Besora, J., Coch, H., Pardal, C. 2019.

216 Jim, C.Y. 2017.

217 Martínez, A. 2005; Llopis, M.T. 2010.

218 Llopis, M.T. 2010.



Figura 2.30. Jardín colgante detrás de la villa urbana y galería de paseo sobre la azotea. Manuscrito de París de Leonardo da Vinci.

Otros proyectos posteriores muestran esta intención de colonizar funcional y estéticamente las cubiertas planas mediante vegetación, aunque la mayoría de ellos, debido a las limitaciones y restricciones de los sistemas constructivos de la época, todavía permeables y de gran peso propio, no llegaron a ser construidos. Por ejemplo, la **residencia del Obispo de Passau** (1705), proyecto no construido ideado por Johann van Lamberg, en el cual se planteaba la azotea como espacio de paseo y como mirador, incluyendo elementos vegetales propios del romanticismo literario<sup>219</sup>; o el prototipo de cubierta transitable de cartón impermeable (cartón impregnado de alquitrán) que presentó Karl Rabitz en la **Exposición Universal de París** (1867). Modelo al cual posteriormente otros arquitectos plantearon añadir árboles y vegetación<sup>220</sup>.

La construcción tradicional que se basaba en elementos pesados como la tierra y la piedra, siglos más tarde, fue evolucionando hacia el uso de tableros multicapa de materiales pétreos o rasilla cerámica que sustituían la tierra o piedra, reduciendo el peso, pero también la capacidad de aislamiento<sup>221</sup>, además de presentar un riesgo elevado a la fisuración o rotura si se cohibía la dilatación<sup>222</sup>. Posteriormente, con la intención de mejorar el comportamiento térmico de la cubierta se introdujo una cámara de aire entre la estructura de la cubierta y el falso techo<sup>223</sup>. En sucesivas evoluciones de este sistema se acabó desplazando esta cámara hacia el exterior, en este caso sobre el forjado, no bajo él. La cámara de aire sobre el forjado, conformada con tabiques de soporte en los que apoyaba el solado (sistema de cubierta ventilada denominado *a la madrileña*, que más tarde pasó a llamarse *a la catalana/a la sevillana*)<sup>224</sup>, mejoraba el comportamiento impermeable de la cubierta y su funcionamiento higrótérmico. La cámara de aire servía, durante el verano, para disipar el calor producido por la radiación solar incidente en la superficie de la cubierta y, en invierno, para establecer una temperatura intermedia entre la exterior y la interior y ayudar a disipar el vapor de agua producido en el interior, evitando las condensaciones intersticiales<sup>225</sup>. Hasta los años 40 del siglo XX fue el

219 Llopis, M.T. 2010.

220 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014; Martínez, A. 2005.

221 IVE. 2011.

222 Ramos, F. 1997.

223 IVE. 2011.

224 *Ibidem*.

225 Britto, C. 2001.



sistema más empleado, especialmente en el clima mediterráneo, a pesar de que todavía se debían tomar medidas para no coartar las dilataciones y contracciones a las que se veía sometida la cubierta debido a las grandes oscilaciones de temperatura diarias y anuales<sup>226</sup>.

Con la evolución del sistema constructivo, la reducción del peso y el control parcial de la humedad y las filtraciones, las ideas de ajardinar las cubiertas fueron tomando forma real, aunque en contados ejemplos, como la **Villa Hennebique** (1904). Construida por el arquitecto François Hennebique para su familia, dispuso todo un plano continuo que cubría la totalidad de la vivienda y que transformó en un jardín con senderos, un huerto e incluso un invernadero para especies exóticas<sup>227</sup> (Figura 2.31).



Figura 2.31. Villa Hennebique (París, Francia).

Con el desarrollo de las primeras láminas impermeables (en el periodo de entreguerras, coincidiendo con el Movimiento Moderno y las vanguardias artísticas), estas se colocaron en el nuevo sistema de cubierta plana, sobre los tableros cerámicos, pero se deterioraban con gran rapidez debido a las variaciones de temperatura, a las deformaciones diferenciales y a la incidencia directa de la radiación solar<sup>228</sup>. Aun así, supusieron una revolución en el uso y desarrollo de las cubiertas planas.

Ejemplos como el proyecto no construido de la **Maison Particulière** (1923) (Figura 2.32), colaboración del pintor Theo Van Doesburg y el arquitecto Corneils van Eesteren, o la **Casa Schröder** (1924) (Figura 2.33), proyecto de Gerrit Rietveld construido en Utrecht (Países Bajos), establecieron las bases de lo que más adelante llamaría Le Corbusier la *quinta fachada*, es decir donde la cubierta se convierte en un muro más, dispuesto en horizontal, y se reconoce como elemento útil dentro de la vivienda y con capacidad de recibir un posible tratamiento ajardinado<sup>229</sup>. En ambos proyectos se aprecia el papel de la cubierta como elemento estético bajo los principios compositivos de De Stijl y el neoplasticismo.

La llegada del Movimiento Moderno (1925-1965) y el desarrollo de materiales impermeables en Estados Unidos, junto con la arquitectura racional e industrializada de rascacielos y fábricas, supuso un verdadero auge de las cubiertas planas transitables<sup>230</sup>, ahora con poco peso y con materiales impermeables, aunque con el paso del tiempo, como ya se ha comentado, se deterioraran con rapidez. Esta revolución constructiva llega a las cubiertas ajardinadas de la mano de los cinco puntos de la nueva arquitectura de Le Corbusier (1926). En ellos plantea devolver a la ciudad la superficie ocupada por el edificio mediante la *terrace-jardin*, ofreciendo un espacio verde, de ocio y contemplación<sup>231</sup>. Un año después, en 1927, publicó en la revista *L'Architecture Vivante* la *Theorie du toit-jardin* que profundiza en el desarrollo de la cubierta con una función

226 Ramos, F. 1997.

227 Martínez, A. 2005.

228 IVE. 2011; Ramos, F. 1997.

229 Gómez, E.D. 2015; Ramos, F. 1997.

230 Gómez, E.D. 2015.

231 *Ibidem*.



habitable<sup>232</sup>. Sus investigaciones sobre la arquitectura vernácula, juntamente con los avances tecnológicos de la época, le sirvieron en la construcción de algunos de sus edificios más emblemáticos con *terraza-jardín*, como la **Casa Doble** (actualmente *Weissenhofmuseum*) (1927) (Figura 2.34), que realizó junto a Pierre Jeanneret, o la **Villa Savoye** (1929) (Figura 2.35).

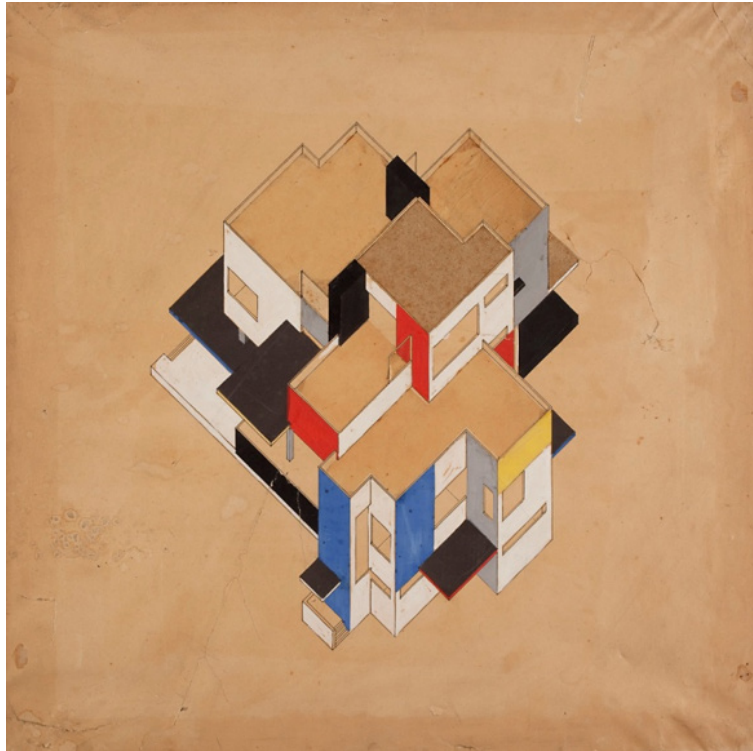


Figura 2.32. *Maison Particulière*, proyecto no construido.



Figura 2.33. *Casa Schröder* (Utrecht, Países Bajos).

232 Gómez, E.D. 2015.



Figura 2.34. Terraza-jardín de la Casa Doble (Stuttgart, Alemania).



Figura 2.35. Promenade architecturale a través de las terrazas de la Villa Savoye (Poissy, Francia).

En la década de 1940, la aparición de hormigones aligerados permitió sustituir las cámaras de aire por un cuerpo aislante realizado con este material, definiéndose una cubierta multicapa ya muy similar al sistema empleado actualmente, compuesta por el forjado horizontal, el hormigón aislante y de pendientes (con un mimbel perimetral que disminuía los problemas de fisuración y estanqueidad al permitir la dilatación), la lámina impermeable y la protección<sup>233</sup>.

En la década de 1950, con la generalización del uso de la calefacción, aumentó la presión de vapor en el interior de las viviendas, haciéndose necesaria la colocación de una barrera de vapor entre el forjado y el hormigón aligerado, evitando humedades bajo la lámina impermeable. En esa misma década, en Estados Unidos, se empezó a aplicar la cubierta invertida, ya que los avances científicos de este país permitieron detectar con mayor precisión en qué capas se producían condensaciones, por lo que colocaron la lámina impermeable bajo el aislamiento térmico, realizando funciones impermeables y de barrera de vapor. En España no se llegó a aplicar la cubierta invertida hasta la década de 1970<sup>234</sup>.

También en esas décadas, aproximadamente a principios de los años 60 del siglo XX, se inicia una profundización en el sistema constructivo multicapa aplicado a las cubiertas planas ajardinadas<sup>235</sup>. Previo a esto ya se realizaron aplicaciones piloto de la cubierta ajardinada en la sociedad moderna, como en la reforma

233 IVE. 2011.

234 *Ibidem*.

235 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., *et al.* 2010.



de las cubiertas de los edificios bajos del **Rockefeller Center** (1931)<sup>236</sup>. Raymond Hood proyectó una combinación de vegetación colgante, árboles frondosos y elementos de agua en las cubiertas de cada uno de los edificios bajos, conectando sus cubiertas mediante puentes peatonales en medio de la ciudad de Nueva York (Estados Unidos). Tras su muerte, el equipo encargado de ejecutar el proyecto lo simplificó con el uso de tapices verdes con plantas decorativas, eliminando los puentes de conexión entre cubiertas<sup>237</sup>. Este diseño es el que se puede observar todavía en la actualidad (Figura 2.36).



Figura 2.36. Cubiertas ajardinadas de los edificios bajos del Rockefeller Center (Nueva York, Estados Unidos).

Pero el inicio del desarrollo conceptual y el estudio de las propiedades y características de las cubiertas ajardinadas se produjo en el centro de Europa (especialmente en Alemania) a mediados del siglo XX, derivado de la crisis energética vivida en el momento, ya que las cubiertas ajardinadas se empleaban para reducir el consumo energético de los edificios<sup>238</sup>. La gran expansión en su uso se produjo en la década de 1980, concluyendo en la publicación, en 1998, de la primera guía técnica para cubiertas ajardinadas, de la mano de la *Landscape Development and Landscaping Research Society e. V.*, más conocida como FLL (del alemán *Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*)<sup>239</sup>.

Este desarrollo ha continuado hasta la actualidad, avanzando con paso firme en la evolución del sistema constructivo y su aplicación. Por ejemplo, en 2003 el 14 % de toda la superficie de cubiertas de Alemania eran sistemas ajardinados<sup>240</sup>. Debido al coste de construcción más elevado de este tipo de cubiertas y a los materiales, todavía en constante desarrollo y mejora, las cubiertas ajardinadas se han podido observar especialmente en edificios de uso público como museos, bibliotecas, estaciones de tren/autobús, etc., en la última década del siglo XX y la primera del siglo XXI, marcadas por el desarrollo urbanístico masificado, la arquitectura de propaganda, la crisis económico-social y la escasa preocupación por el medio ambiente.

Algunos ejemplos de esta arquitectura ajardinada pública sería el **Oakland Museum** (1961). Construido en California (Estados Unidos) por los arquitectos Kevin Roche y John Dinkeloo, se diseñó con una cubierta urbana que cierra superiormente el museo mediante terraplenes que se asemejan a la topografía previa de la parcela, enlazando el museo con la ciudad y permitiendo que los ciudadanos o los visitantes puedan pasear por la cubierta<sup>241</sup> (Figura 2.37).

236 Novoa, W.A. 2016.

237 Gómez, E.D. 2015.

238 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., et al. 2010.

239 Novoa, W.A. 2016; FLL. 2018.

240 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., et al. 2010.

241 Gómez, E.D. 2015.





Figura 2.37. Cubierta del Oakland Museum (California, Estados Unidos).

La **Biblioteca Universitaria de Delft** (1995), proyecto del Equipo Mecanoo, combina los espacios planos y con pendiente para prolongar el espacio público frente al auditorio como una alfombra verde que invade la cubierta de la biblioteca (Figura 2.38). Además de aportar aislamiento térmico al interior, es un espacio muy apreciado para los usuarios como zona de descanso y ocio gracias a su orientación<sup>242</sup>.



Figura 2.38. Biblioteca Universitaria de Delft (Países Bajos).

El **Ayuntamiento de Getafe** (1996), realizado por Francisco Rodríguez de Partearroyo, se trata del primer edificio público de España dotado con una cubierta aljibe y ajardinada<sup>243</sup>. Se construye con una pendiente 0 y con una altura máxima de agua de 7 cm, disponiendo zonas vegetales y peatonales combinadas sobre la capa de agua<sup>244</sup> (Figura 2.39).

242 Gómez, E.D. 2015.

243 Britto, C. 2001.

244 Caballero, F.R. 2004.



Figura 2.39. Cubierta aljibe y ajardinada del Ayuntamiento de Getafe (Madrid, España).

Otro ejemplo, en este caso ubicado en Japón, es la **terminal marítima de Yokohama** (2002), diseñada por el estudio FOA. El proyecto actúa sobre la topografía, presentándose como una continuación de la trama urbana que genera un espacio multifuncional que funciona como parque en altura<sup>245</sup> (Figura 2.40). La topografía viva hace que la calle y la cubierta se confunda, mejorando la circulación de peatones, vehículos y el acceso a los transbordadores.

El uso de la cubierta ajardinada para mimetizar el edificio con el entorno y adaptarlo al emplazamiento también se empleó en el **Museo de Historia de la Vendée** (2002). El grupo Plan01 architects mostraron su intención de hacer desaparecer 6000 m<sup>2</sup> de museo en el paisaje mediante el empleo de una cubierta ajardinada que permitía que la cubierta se entendiera como una continuación de los campos que formaban el entorno natural del cauce del río Boulogne<sup>246</sup> (Figura 2.41).

De nuevo en España, el **Proyecto** (todavía sin construir) **para la estación intermodal de Gijón**, de Junqueiras Arquitectos, se plantea como un edificio enterrado de 400 metros de longitud en una parcela en pleno casco urbano<sup>247</sup>, permitiendo que su cubierta conforme un parque de topografía ondulante que aportará continuidad a los parques cercanos y no supondrá una barrera que corte la ciudad de norte a sur (Figura 2.42). La intención es generar un parque amable y atractivo que pueda usar toda la población, fundiendo ambos márgenes de la ciudad y acabando con la actual barrera ferroviaria.



Figura 2.40. Terminal marítima de Yokohama (Japón).

245 Gómez, E.D. 2015.

246 Tectónica. 2011.

247 Gómez, E.D. 2015.



Figura 2.41. Museo de Historia de la Vendée (Francia).

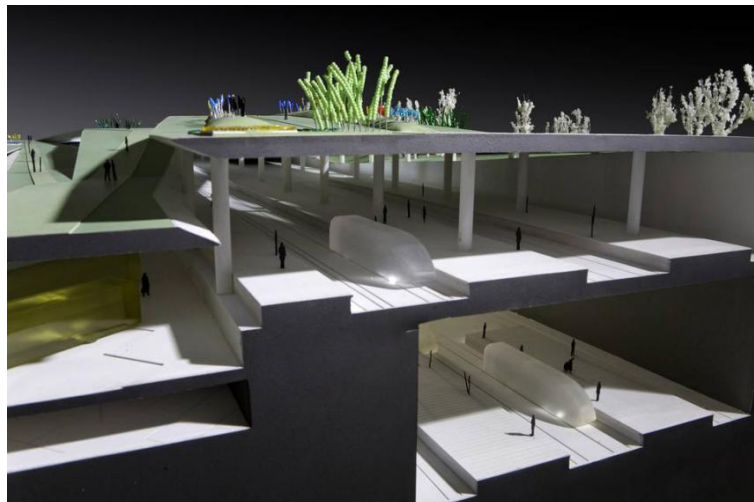


Figura 2.42. Proyecto para la estación intermodal de Gijón (España).

En el ámbito de la arquitectura residencial existen también ejemplos de la integración de las cubiertas planas, aunque, como se ha mencionado anteriormente, sean de menor alcance y repercusión. En los últimos años, el auge de la sostenibilidad y la preocupación por el medio ambiente sí que ha supuesto una revitalización del uso de las cubiertas ajardinadas, su investigación y aplicación (véase apartado 2.5.1). Aun así, existen ejemplos como el caso de las **Viviendas Halen** (1962). El grupo de arquitectos Atelier 5 configuraron, a partir de viviendas de, normalmente, dos alturas insertadas en el terreno en cuerpos lineales, un elemento de cubierta continuo del conjunto de viviendas, a pesar de que cada una de ellas era constructivamente independiente, facilitando su transformación en una plantación continua de especies vegetales<sup>248</sup> (Figura 2.43).

248 Martínez, A. 2005.



Figura 2.43. Cubierta ajardinada en el conjunto de viviendas Halen (Berna, Suiza).

Otro ejemplo lo podemos observar en la **Residencia universitaria de L'Aquilone** (1983). Este proyecto, al igual que los otros tres colegios mayores similares (Tridente, Vela y Colle), de Giancarlo de Carlo, también representa la necesaria vida colectiva de los estudiantes, empleando en la cubierta el pavimento flotante y el ajardinamiento como protección de la lámina impermeable de la cubierta, facilitando el uso transitable y público de este espacio<sup>249</sup> (Figura 2.44).



Figura 2.44. Residencia universitaria de L'Aquilone (Urbino, Italia).

249 Britto, C. 2001.



### 2.4.2.1 Cronología de las cubiertas planas ajardinadas

A continuación, se presenta la cronología de las cubiertas planas ajardinadas mencionadas en el apartado anterior para una mejor comprensión de la evolución histórica (Figura 2.45).

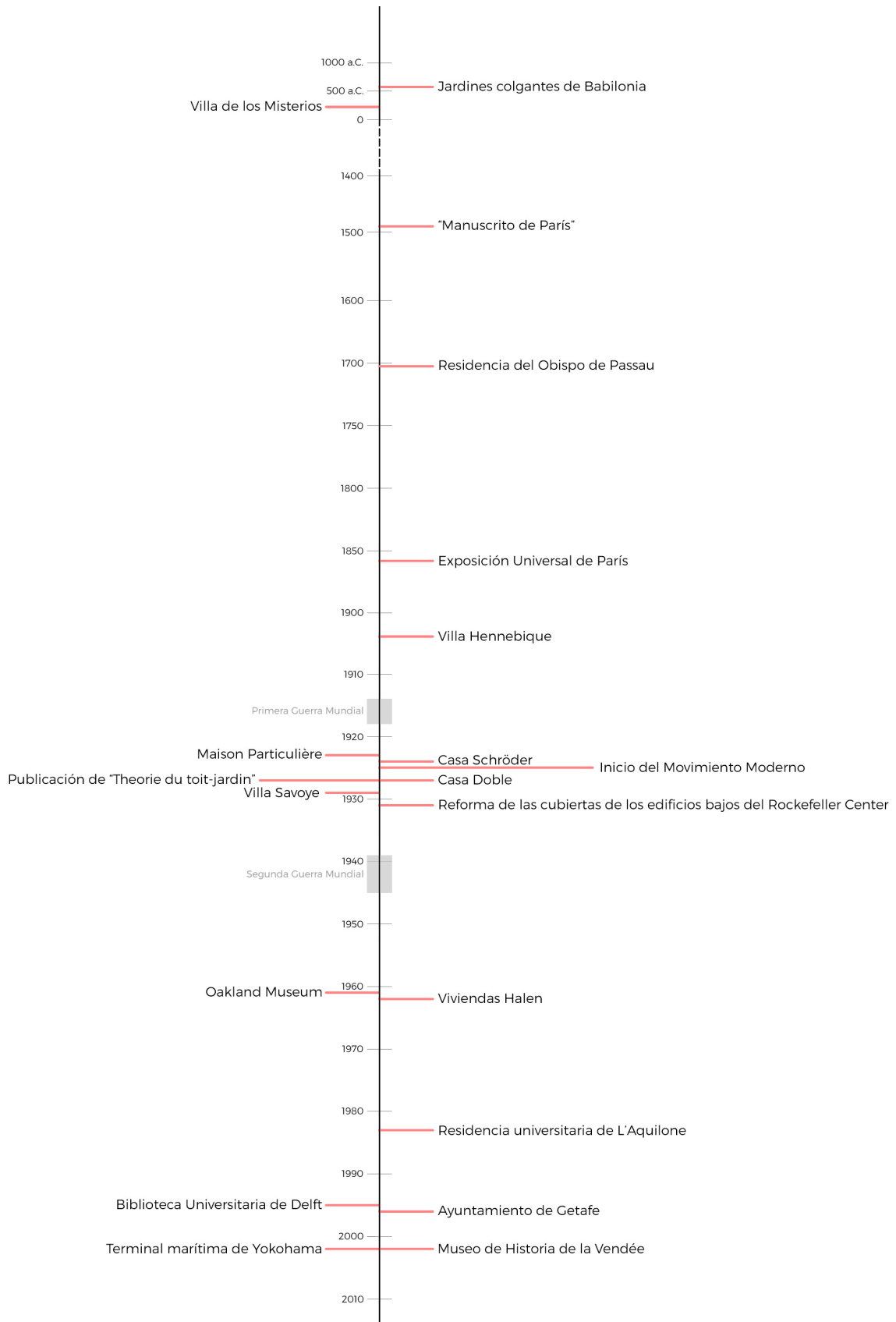


Figura 2.45. Línea temporal de cubiertas planas ajardinadas.



## 2.5 LA CUBIERTA AJARDINADA Y LA SOSTENIBILIDAD

### 2.5.1 Situación actual de las cubiertas planas ajardinadas en el panorama mundial

Como ya se ha observado, la introducción de las cubiertas planas ajardinadas, especialmente en el campo de la construcción privada residencial, está siendo más dilatada en el tiempo y con un ritmo que, hasta hace unos pocos años, no se adaptaba a la carrera de la sostenibilidad. Esto se debe, en gran parte a que, al tratarse de un sistema innovador, no disponerse de grandes ejemplos en la arquitectura de vanguardia y carecer de información contrastada acerca de sus propiedades, pros y contras, las cubiertas planas ajardinadas no se han mostrado como una opción atrayente para los usuarios (que, como se ha comentado anteriormente, valoran más la reducción del coste de construcción que el valor económico, social, ambiental y estético aportado por la instalación de vegetación en el sistema constructivo de cubierta).

En estos casos, una herramienta muy eficaz para incentivar la instalación de cualquier sistema innovador son las políticas públicas, haciendo accesibles, en este caso las cubiertas ajardinadas, tanto a nivel teórico como constructivo, al resto de la población<sup>250</sup>. Países como Estados Unidos, Canadá, Australia, Singapur y Japón están llevando a cabo fuertes iniciativas para fomentar el uso de cubiertas ajardinadas en edificios de nueva planta y en cubiertas que se rehabiliten en edificios antiguos<sup>251</sup>. Entre las principales motivaciones que llevan a las ciudades de estos países a promover políticas favorables a las cubiertas ajardinadas son la existencia de problemas climáticos urgentes y/o la convicción sobre la creación de una Infraestructura Verde, integradora y resiliente<sup>252</sup> (Tabla 2.5). Con programas que favorecen u obligan a la instalación de cubiertas ajardinadas se fomenta el desarrollo de un ambiente sostenible, mejorando la apariencia y la salud de la ciudad<sup>253</sup>.

En Canadá, en la ciudad de Toronto, se ha instaurado una normativa de obligado cumplimiento que se aplica sobre edificios de nueva planta con más de 200 m<sup>2</sup> de superficie, debiendo incluir una cubierta ajardinada que ocupe entre el 20 % y el 60 % del total del área de cubierta<sup>254</sup>. En Estados Unidos, cogiendo el ejemplo de Chicago (Illinois), el *Green Permit Program* fomenta el desarrollo y la incorporación de diseños sostenibles, entre ellos la cubierta ajardinada, en nuevos edificios. Gracias a ello, en 2014 Chicago llegó a tener 516 951 m<sup>2</sup> de cubiertas ajardinadas<sup>255</sup>. En Portland (Oregón, Estados Unidos) se incentiva a los habitantes a instalar de cubiertas ajardinadas con la creación de un bonus por ratio de área de cubierta ajardinada, relacionándolo con la capacidad de esta de reducir la carga de agua de lluvia sobre el sistema de alcantarillado<sup>256</sup>. En Nashville (Tennessee, Estados Unidos) esta misma promoción de las cubiertas ajardinadas se realiza con la reducción en \$10 del impuesto de alcantarillado por cada metro cuadrado de cubierta ajardinada<sup>257</sup>.

En Japón, la normativa existente se aplica sobre todas las construcciones nuevas, debiendo instalar una cubierta ajardinada en función de su superficie: los edificios públicos de más de 250 m<sup>2</sup> y los edificios privados de más de 1000 m<sup>2</sup> deben convertir en ajardinada al menos el 20 % de la cubierta o pagar en torno a 1840 € al año como penalización<sup>258</sup>. También en China y Corea del Sur el gobierno incentiva la instalación de cubiertas ajardinadas tanto en el sector público como en el privado<sup>259</sup>.

En Argentina, se inició en 2006 un proyecto de renovación de 3500 ha, a partir de la publicación del gobierno central de la *Construcción del gris al verde*, en colaboración con la empresa de producción y comer-

250 Sutton, R.K. 2015.

251 Vijayaraghavan, K. 2016.

252 Sutton, R.K. 2015.

253 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

254 Ibídem.

255 Ibídem.

256 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

257 Ibídem.

258 Ibídem.

259 Ibídem.



cialización de cemento y materiales de construcción, HOLCIM<sup>260</sup>. En México, el gobierno y la multinacional SIKA impulsaron esta misma iniciativa, convirtiéndose en 2010 en el primer país latinoamericano en organizar el Congreso Mundial de Azoteas Verdes, en su sexta edición<sup>261</sup>.

PAÍS	CIUDAD	CALIDAD DE AGUA DE ESCORRENTÍA	CANTIDAD DE AGUA DE ESCORRENTÍA	EFEECTO ISLA DE CALOR	ESPACIO VERDE EN LA CIUDAD	AHORRO ENERGÉTICO	CALIDAD DEL AIRE	BIODIVERSIDAD	AGRICULTURA URBANA
Canadá	Toronto								
	Montreal								
	Vancouver								
Estados Unidos	Chicago								
	Nueva York								
	Baltimore								
	Atlanta								
	Washington								
	Austin								
	Seattle								
	Filadelfia								
	San Francisco								
	Pittsburgh								
	Minneapolis								
Alemania	Berlín								
	Colonia								
	Münster								
	Stuttgart								
Bélgica	Waterloo								
Suiza	Basilea								
Inglaterra	Londres								
Japón	Tokio								
Singapur	Singapur								

Tabla 2.5. Principales motivos para la aplicación de cubiertas ajardinadas en 25 ciudades mundiales.

En Europa, las principales iniciativas públicas para la instalación de cubiertas ajardinadas se encuentran en los países del centro y el norte del continente. En Darmstadt (Alemania), los dueños de edificios nuevos o rehabilitados pueden llegar a percibir de los fondos públicos hasta 5000 € por instalar una cubierta ajardinada<sup>262</sup>. En otras ciudades alemanas, como Colonia, Mannheim o Bonn, se aplican medidas similares a las de Nashville, con una reducción del impuesto por aguas pluviales para aquellos usuarios que dispongan de cubierta ajardinada<sup>263</sup>. En Austria y Suiza también se aplican políticas similares, como en el caso de Basilea

260 Novoa, W.A. 2016.

261 Ibídem.

262 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

263 Ibídem.



(Suiza), donde los dueños que decidan instalar cubiertas ajardinadas reciben de vuelta el 20 % del coste total de su instalación<sup>264</sup>.

En Oporto (Portugal) se ha desarrollado el proyecto *Quinto Alçado do Porto*, con el objetivo de estudiar la mejor manera de implementar políticas que incluyan las cubiertas ecológicas en las estrategias urbanísticas, aunque actualmente ninguna ciudad de Portugal tiene una legislación o una regulación de incentivos para promover la instalación de cubiertas ajardinadas<sup>265</sup>. En Milán (Italia), se ha promovido la iniciativa *Milano Clever Cities* con la intención de motivar la rehabilitación de las actuales cubiertas tradicionales en ajardinadas, esperando alcanzar un aumento de la superficie verde en un 625 % con el horizonte puesto en el año 2030<sup>266</sup>. Se facilita el acceso a líneas de crédito, se realizan colaboraciones conjuntas entre organizaciones municipales y profesionales técnicos, como arquitectos, y se promueven y realizan actuaciones de sensibilización y educación de la población<sup>267</sup>.

Una circunstancia similar se desarrolla en España. Actualmente no existe una regulación nacional de fomento o apoyo a la instalación de cubierta ajardinadas, pero cada vez se percibe una mayor preocupación por la sostenibilidad y la mejora del entorno ambiental de las ciudades y paisajes construidos. Por ejemplo, desde el ayuntamiento de la ciudad de Gandía (España) ha aprobado, en el último trimestre de 2022, una modificación del Plan General de Ordenación Urbana (PGOU)<sup>268</sup>, en el que se incluye la obligatoriedad de instalar cubiertas ajardinadas en edificios de nueva planta de uso exclusivo terciario, comercial, hotelero, de servicios y equipamiento de carácter público o privado con una superficie de cubierta mayor o igual a 800 m<sup>2</sup>. Esto se plantea tanto si la cubierta es no transitable, pudiéndose repartir la superficie de la cubierta ajardinada con la instalación de paneles solares u otras instalaciones, como si es transitable, debiendo disponer en este caso, por lo menos, un 40 % de la superficie de cubierta para la plantación de especies vegetales. Los edificios residenciales no se incluyen en esta obligatoriedad, pero si que se recomienda la instalación de cubiertas ajardinadas y se deja la puerta abierta a la implantación de incentivos de carácter urbanístico o fiscal para promover su instalación. A nivel nacional se puede observar un impulso, cada vez más insistente, de la renovación energética del parque de viviendas actual, como puede derivarse del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia presentado por el Gobierno de España<sup>269</sup> (véase apartado 2.5.4).

Más allá del apoyo o las ayudas públicas, en circunstancias como estas también es un importante motor la existencia de ejemplos emblemáticos y funcionales del sistema innovador en cuestión. En Milán (Italia) los arquitectos Boeri Studio concluyeron, en 2014, el complejo residencial *Bosco Verticale*, compuesto por dos torres de viviendas (Figura 2.46 y 2.47). La interrelación de las personas con la naturaleza, desde un plano cotidiano, se plantea en este caso desde el espacio privado de cada vivienda, generando *pequeñas* cubiertas ajardinadas en cada uno de los balcones. Se configura así un espacio natural en altura equivalente a 30 000 m<sup>2</sup> de bosque y vegetación, que con el paso de los años no solo ha acogido a los usuarios de las viviendas sino también a parte de la fauna perdida tras la urbanización del área, con casi 1600 especies de aves y mariposas<sup>270</sup>.

En València, otro edificio emblemático que también empleó este recurso, pero en este caso que data de principios de 1980, cuando la vegetación todavía tenía un sentido más estético que sostenible, es *Espai Verd*. Este edificio, del estudio de arquitectura CSPT, se planteó desde sus inicios como la construcción en altura de viviendas, tipo chalet, con jardín. Se concluyó así en una construcción que coordina verticalmente la existencia de terrazas ajardinadas con un pequeño bosque en el patio interior de manzana que ayuda a organizar perimetralmente los cuerpos de viviendas y potencian la posibilidad de socialización entre los diferentes usuarios de las 108 viviendas<sup>271</sup> (Figura 2.48 y 2.49).

264 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

265 De Felipe, I. 2018.

266 Procaccini, G., Monticelli, C. 2021.

267 Clever Cities Milano. 2022.

268 Ajuntament de Gandia. 2022.

269 Gobierno de España. 2021.

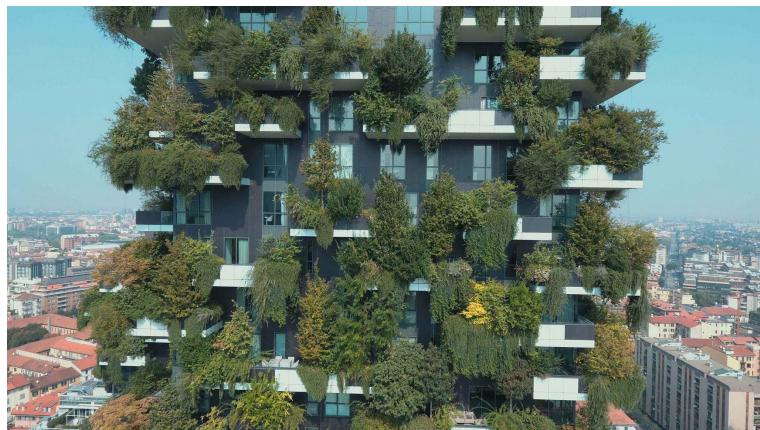
270 BOERI Stefano Boeri Architetti. 2022.

271 Molina, M.C. 2020.





*Figura 2.46. Torres residenciales Bosco Verticale (Milán, Italia).*



*Figura 2.47. Cubiertas ajardinadas en el espacio privado de cada vivienda, a modo de balcón.*



Figura 2.48. Terrazas ajardinadas a diferentes niveles en el edificio Espai Verd (València, España).



Figura 2.49. Visión desde el bosque del patio interior de manzana hacia las terrazas ajardinadas.

Otro ejemplo en València, más actual y con carácter público, es la *Biblioteca de Ciències Socials Gregori Maians*, de la *Universitat de València (UV)*, inaugurada en 1998 por un equipo de arquitectos liderados por Giorgio Grassi. El aparcamiento, que se sitúa en el zócalo o base de piedra del gran edificio, se cubrió con vegetación, conformando una cubierta ajardinada que sirve como zona de recreo y vestíbulo exterior antes de entrar en la biblioteca<sup>272</sup> (Figura 2.50).

272 Colegio Territorial de Arquitectos de València (CTAV). 2022.



Figura 2.50. Biblioteca de Ciències Socials Gregori Maïans (València, España).

Otro ejemplo es la instalación en 2010, en la Central Operativa de Saneamiento y en la Estación de Bombeo Doctor Lluch, de tres muros equipados con un jardín vertical y una cubierta ajardinada, sumando 1152 m<sup>2</sup> de estructura verde al entramado urbano de València<sup>273</sup>. Se planteó en aquel momento incluso la posibilidad de que, en la nueva reorganización urbana del barrio de El Grao, donde se ubican estos edificios, se convirtieran al menos un 50 % de las cubiertas en vegetales<sup>274</sup>. Pero la falta de legislación o incentivos al respecto en las últimas décadas han producido que ni el 50 % de cubiertas vegetales ni el nuevo paisaje ecológico hayan sucedido.

La integración de la vegetación en la trama urbana y el desarrollo de diseños sostenibles, por lo tanto, debe fomentarse en un primer estadio, como se ha mencionado anteriormente, por parte de la administración pública, pero de una forma sensata y eficiente, consiguiendo que los usuarios aprecien los beneficios de estos nuevos sistemas y se informen de manera adecuada de las posibles restricciones. Un ejemplo muy significativo en este sentido es la iniciativa *Ekostaden*, en el distrito de Augustenborg (Malmö, Suecia).

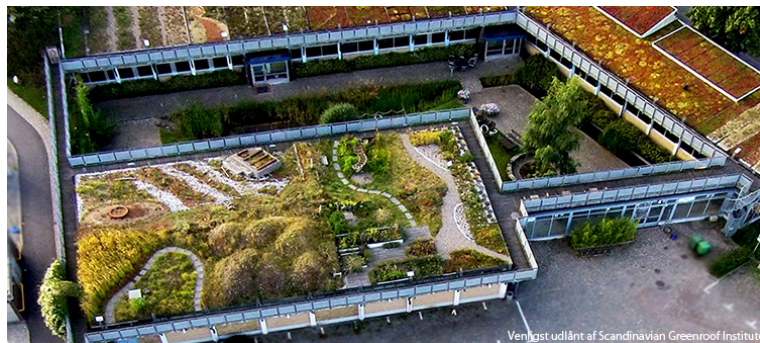


Figura 2.51. Cubiertas ajardinadas como parte de la iniciativa Ekostaden (Malmö, Suecia).

En 1998 se inició un proceso de transformación del existente *ghetto* residencial, con problemas de inundaciones debido al suelo arcilloso poco absorbente y a las grandes áreas impermeables, a un emplazamiento que mejoraba la gestión del agua de lluvia mediante un diseño sostenible, como el uso de cubiertas ajardinadas<sup>275</sup> (Figura 2.51). El proyecto se concluyó en 2005, y actualmente Augustenborg es una de las capitales del medio ambiente, consiguiendo con la renovación de un grupo de apartamentos de baja calidad y mal acondicionamiento de la década de 1950, un aumento de la ocupación de sus viviendas, una reducción en la tasa de desempleo (pasando del 60 % al 6 %<sup>276</sup>) y una reducción de problemas ambientales<sup>277</sup>. La

273 ABC Comunidad Valenciana. 2010; Costa, M. 2010.

274 Costa, M. 2010.

275 Llopis, M.T. 2010.

276 Comisión Europea. 2014.

277 Llopis, M.T. 2010.



renovación consistió, entre otros, en la instalación de paneles solares térmicos en las cubiertas de la zona industrial, paneles fotovoltaicos para generar electricidad, una renovación del revestimiento existente en las fachadas (datado de 1970, y que podía alcanzar un 10 % de ahorro energético total si se actuaba sobre él), la instalación de 10 000 m<sup>2</sup> de cubiertas ajardinadas, la integración de un sistema abierto de recogida y gestión de aguas pluviales (Figura 2.52) y la reducción del límite de velocidad en las calles locales a 15 km/h (fomentando la circulación a pie o en bicicleta)<sup>278</sup>. El proyecto costó alrededor de 22 millones de euros, pero los beneficios generados son claramente visibles para toda la población: los índices de escorrentía de agua de lluvia se han reducido a la mitad (y, por lo tanto, también se ha producido una reducción de las inundaciones), los residentes se han beneficiado de un importante ahorro energético y la biodiversidad ha aumentado en un 50 %<sup>279</sup>. Con estos datos, sumado a la mejora de la salud del barrio y de sus habitantes, y a las mejores condiciones sociales (con la reducción de la tasa de desempleo y de abandono del barrio), los usuarios han vivido la realidad del diseño sostenible. En este caso, será mucho más fácil que se impliquen en el mantenimiento de este sistema y en el desarrollo y ampliación futuros.



Figura 2.52. Sistema abierto de recogida de aguas pluviales en Augustenborg (Malmö, Suecia).

### 2.5.2 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Como se ha indicado, las cubiertas planas ajardinadas se han convertido, en los últimos años, en herramientas eficaces para conseguir las metas de sostenibilidad que los desequilibrios entre económica, sociedad y medio ambiente han impuesto como urgentes. Las primeras cubiertas con vegetación espontánea y, con el tiempo, con finalidades estéticas, evolucionaron poco a poco hasta tener una importancia clave en el ahorro energético y el cuidado al medio ambiente. Se sitúan, en la actualidad, como centro de muchas políticas públicas y proyectos estandarizados que pretenden hacer de este sistema constructivo ajardinado parte de una solución al problema del deterioro ambiental, de la calidad de las ciudades, del consumo de recursos y de la contaminación.

La arquitectura, por lo tanto, en su vertiente sostenible debe buscar estos logros. El grupo estadounidense Architecture 2030, un grupo medioambiental fundado en 2002 por Edward Mazria, y pionero en el desarrollo de la arquitectura solar pasiva, presentó la guía *Desafío 2030*, prestando especial atención al concepto del ahorro en el consumo energético y la contaminación<sup>280</sup>. El principio fundamental de esta guía es conseguir que todos los edificios y urbanizaciones de nueva construcción, y los proyectos de rehabilitación integral, se diseñen con la intención de consumir menos de la mitad de energía procedente de combustibles fósiles que un edificio convencional. La intención es que los objetivos de reducción de consumo de energías fósiles vayan aumentando, como se puede observar en la gráfica de la figura 2.53, siendo del 70 % en 2015, del 80 % en 2020, del 90 % en 2025 y para 2030 conseguir que todos los edificios construidos sean carbo-

278 Llopis, M.T. 2010.

279 Comisión Europea. 2014.

280 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.



neutrales, es decir, que no necesiten ningún tipo de energía de origen fósil para su construcción y posterior uso<sup>281</sup>.

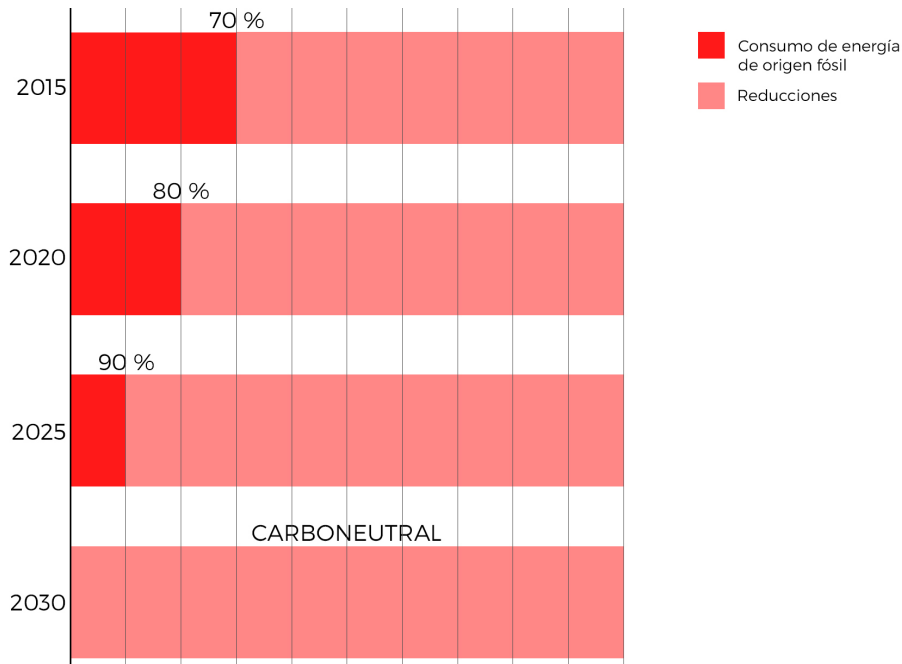


Figura 2.53. Reducción del consumo de energía de origen fósil de acuerdo con el Desafío 2030.

En el panorama europeo destaca, en el camino de la sostenibilidad y la resiliencia al cambio climático y sus consecuencias ambientales, sociales y económicas, los ODS, Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas<sup>282</sup> (Figura 2.54). El 25 de septiembre de 2015, 193 países (entre ellos España) se comprometieron con los **17 Objetivos de Desarrollo Sostenible**, que persiguen proteger el planeta, conseguir la igualdad entre personas y asegurar la prosperidad, estableciendo una nueva agenda que se centra en el desarrollo en base a los tres pilares de la sostenibilidad, ya que ha quedado claro que ninguna combinación que olvide alguno de ellos puede funcionar y ser equilibrada<sup>283</sup>. En España, con la *Agenda 2030*, se integran estos objetivos con la intención de que se cumplan para el año 2030.



Figura 2.54. 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.

281 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

282 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

283 *Ibidem*.



Como ya se ha ido mencionando previamente, las estrategias propias de la arquitectura sostenible adquieren mayor relevancia en tanto que alcanzar los ODS depende en gran parte de la construcción presente y futura de edificios y ciudades. De los 17 objetivos<sup>284</sup> se han destacado a continuación aquellos en los que las cubiertas ajardinadas, como parte de la arquitectura sostenible, tienen mayor capacidad e influencia para mejorar la situación actual y ayudar en la consecución de estas metas.

- **Objetivo 2: Hambre cero.** El propósito principal es la mejora de la alimentación facilitando la accesibilidad de todas las personas a una alimentación sana, nutritiva y suficiente, ocupándose también de la producción de alimentos y la agricultura. Las cubiertas ajardinadas pueden ayudar a desarrollar la producción agrícola a pequeña escala, configurando huertos urbanos que mejoran la autoproducción y la alimentación de proximidad, sin transporte para la distribución de los productos, y por lo tanto ayudando a reducir la emisión de gases contaminantes y el consumo de energía. Al mismo tiempo estas cubiertas se convierten en espacios que recrean ecosistemas y ambientes naturales que pueden ser escenario de la educación ambiental y nutritiva, tanto de niños como de adultos, necesaria para afianzar la mentalidad de una alimentación sana, nutritiva y suficiente.
- **Objetivo 3: Salud y bienestar.** En este caso destacamos el apartado de salud medioambiental, que se centra en la reducción sustancial de muertes y enfermedades producidas por productos químicos peligrosos y la contaminación del aire, el agua y el suelo. En este caso las cubiertas ajardinadas pueden ayudar debido a su funcionamiento como captadores de particular de polvo y contaminantes existente en el aire de las ciudades. Además, reducen sustancialmente la contaminación del agua de escorrentía respecto a una cubierta tradicional, especialmente si se controla el uso de fertilizantes.
- **Objetivo 4: Educación de calidad.** Respecto a la educación global para el desarrollo sostenible, se pretende conseguir que los niños adquieran conocimiento con los que ser capaces de promover el desarrollo sostenible. El contacto directo con la naturaleza que se desarrolla en una cubierta ajardinada puede promover la educación ambiental, a la par que, la difusión de la información referente al uso de vegetación en la cubierta puede ampliar su uso y promover la arquitectura sostenible, tanto desde el punto de vista público como privado.
- **Objetivo 6: Agua limpia y saneamiento.** La combinación de las cubiertas ajardinadas con los sistemas aljibe (*polder roof*) permite almacenar el agua de lluvia y usarla para el propio riego de la vegetación de la cubierta o, si se trata de forma adecuada, también puede emplearse para usos de la vivienda que no necesiten de agua potable. En sentido inverso, las aguas grises de las viviendas, tras un cierto tratamiento, pueden emplearse para el riego y el mantenimiento de las zonas ajardinadas de la cubierta. En ambas circunstancias se consigue un uso más eficiente y optimizado de los recursos hídricos, a la vez que, la capacidad de almacenamiento de agua en una cubierta aljibe o *polder roof*, ayuda a asegurar el abastecimiento de agua dulce frente a la escasez de agua<sup>285</sup>.
- **Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante.** Una de las principales metas, en este caso, es aumentar la proporción de energías renovables en el conjunto de fuentes energéticas. Cualquier cubierta plana, bien diseñada y con la correcta orientación, puede albergar paneles solares o fotovoltaicos, además de que la combinación de estos con las cubiertas ajardinadas aumenta su producción energética. Por otro lado, como en una relación de simbiosis, la instalación de estos paneles también favorece el crecimiento de la vegetación y el aporte de sombra sobre el sustrato.
- **Objetivo 9: Industria, innovación e infraestructura.** El desarrollo de la Infraestructura Verde, como ya se ha comentado anteriormente, implica beneficios ambientales, sociales y económicos, a la par que fomenta la supervivencia de los entornos naturales, la libre movilidad de la fauna y la mejora de la salud de las ciudades y sus habitantes.
- **Objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles.** Este es, desde el punto de vista de esta tesis, uno de los principales objetivos. La intención que persigue es la de lograr ciudades y asentamientos humanos que sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles, estableciendo una relación recíproca de refuerzo entre la urbanización y el desarrollo. El modelo más reciente de ciudad que se ha venido desarrollando, con un crecimiento disperso y diseminado que implica un alto consumo de suelo, la zonificación por usos

284 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

285 *Ibidem*.



y la elevada dependencia del vehículo, ha hecho que la ciudad sea terriblemente vulnerable al cambio climático. La ciudad moderna conlleva problemas en los suministros de agua dulce, las aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública, afectando no solo al medio ambiente, sino también a sus habitantes<sup>286</sup>. Por lo tanto, las principales metas de este objetivo son:

- Aumentar la urbanización inclusiva y sostenible, y la capacidad para la planificación y al gestión participativas, integradas y sostenibles. Se puede emplear el ejemplo de la iniciativa *Terrats Vius*, llevada a cabo en Barcelona (España), y que se presenta como un proyecto participativo e inclusivo que pretende devolver el uso colectivo a las cubiertas mediante la participación activa de todos los agentes del proyecto en su diseño<sup>287</sup>.
  - Aumentar los refuerzos para proteger y salvaguardar el patrimonio cultural y natural del mundo. En este sentido, cabe destacar el papel de las cubiertas ajardinadas como nido de biodiversidad, pudiendo reproducir biotipos de especies en peligro de extinción o que deban ser protegidas por cualquier motivo. Por otro lado, especialmente en cubiertas extensivas, es recomendable emplear especies vegetales autóctonas que ya estén adaptadas al clima, por lo que se reproduce en el entorno natural habitual de la zona donde se implanta la cubierta, tratando de preservar la identidad natural.
  - Reducir las pérdidas económicas y las muertes provocadas por desastres naturales, especialmente relacionados con el agua. Las propiedades de las cubiertas ajardinadas como elementos de control del agua de lluvia las presenta como un recurso útil a nivel urbano para ayudar en la reducción de las inundaciones y en el control del agua que llega a los sistemas generales de recogida de agua.
  - Reducir el impacto ambiental negativo de las ciudades, en especial en relación con la calidad del aire. Como ya hemos comentado en el objetivo 3, la vegetación de las cubiertas ajardinadas absorbe partículas de polvo y contaminantes existentes en el aire de la ciudad, además de ayudar a mejorar el microclima próximo a la cubierta al enfriar la temperatura del aire, lo que permite reducir del efecto de isla calor de las ciudades.
  - Proporcionar el acceso universal a zonas verdes y espacios públicos seguros, inclusivos y accesibles. Como ocurre en ciudades como Barcelona, de denso tejido urbano, en la cota cero resulta complicada la ubicación de espacios verdes y de relación<sup>288</sup>, por lo que la introducción de las cubiertas en esta red verde permite, por un lado, darles un uso a espacios previamente olvidados, y, por otro lado, permite acercar la conexión con la naturaleza y el acceso a espacios verdes sin la necesidad de emplear vehículos.
  - Promover que las ciudades implementen políticas y planes para el uso eficiente de recursos, la mitigación del cambio climático, la adaptación a sus consecuencias y la resiliencia ante los desastres naturales. La promoción pública de las cubiertas ajardinadas puede poner en valor sus propiedades de reducción de la contaminación del aire, del efecto de isla de calor, del consumo de recursos y de energía, de la cantidad de agua de escorrentía que llega al sistema general de recogida de agua, de los contaminantes presentes en el agua de escorrentía, etc.
- **Objetivo 12: Producción y consumo responsable.** Se promueve la gestión y el uso eficiente de los recursos naturales. La accesibilidad de todas las personas a la información y los conocimientos pertinentes para el desarrollo sostenible es necesaria para fomentar un estilo de vida en armonía con el medio ambiente. El papel de los edificios residenciales en este caso es de vital importancia, ya que consumen el 29 % de la energía mundial y contribuyen al 21 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> resultantes<sup>289</sup>. En este caso, al igual que en el objetivo 2, se destaca la cubierta ajardinada como fuente de alimentación, tanto individual como colectiva, para pequeñas comunidades, sirviendo a la vez como espacio y herramienta de educación respecto al consumo responsable y a la limitación de los deshechos. Por ejemplo, los restos orgánicos que se producen en una vivienda se pueden emplear en la realización de compost para la posterior fertilización de la cubierta ajardinada. La cubierta ajardinada también se puede entender como lugar de producción de electricidad en combinación con la instalación de paneles solares. Además, el

286 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

287 Ajuntament de Barcelona. 2015.

288 Ajuntament de Barcelona. 2022; Sistemas de Cubiertas Vegetales. 2018.

289 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.



diseño de la arquitectura sostenible también fomenta el uso de materiales reciclados y de poca energía incorporada, por ejemplo, por ser de producción local y no necesitar de trasportes (reduciendo el consumo energético y la producción de gases contaminantes).

- **Objetivo 13: Acción por el clima.** Junto con el objetivo 11, este es uno de los más importantes desde el punto de vista de la arquitectura sostenible y sus propósitos. Se muestra la necesidad de adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, centrándose en la agricultura, el agua y la energía, sectores especialmente vulnerables a los impactos del cambio climático. Como ya se ha mencionado, los diferentes beneficios ambientales (reducción del riesgo de inundaciones, reducción del consumo energético en las viviendas, captación de CO<sub>2</sub>, etc.) de las cubiertas ajardinadas las convierte en herramientas especialmente interesantes a la hora de combatir el cambio climático. Por otro lado, los principios de diseño sostenible deben perseguir en cualquier construcción el uso de materiales de la zona, que consuman poca energía en su producción, fomentar la reducción del transporte, el empleo de materiales reciclados y la posible reutilización de elementos o componentes de la construcción una vez haya terminado la vida útil del edificio, entre otros.
- **Objetivo 15: Vida de ecosistemas terrestres.** La orientación principal de este objetivo es detener la progresiva degradación de las tierras y la pérdida de la biodiversidad. La tasa de los últimos años de pérdida de tierras cultivables se estima entre 30 y 35 veces la tasa histórica, mientras que, de las 8300 razas de animales conocidas, el 8 % está extinto y el 22 % en peligro de extinción<sup>290</sup>. Las cubiertas ajardinadas permiten reproducir ecosistemas terrestres, pudiendo llegar a reproducir biotipos y/o crear cubiertas naturalizadas para proteger especies en extinción. Al mismo tiempo aumenta la biodiversidad, mejorando el ecosistema urbano, y aportando espacios susceptibles de reemplazar las tierras de cultivo perdidas o los parajes naturales dañados debido a la urbanización masiva.

### 2.5.3 Evaluación de edificios sostenibles

Como ya se ha visto en apartados anteriores, en el panorama actual de fomento y desarrollo de la arquitectura sostenible resulta de gran importancia la promoción pública y política de este nuevo enfoque del diseño de edificios y la planificación urbana. La creación de **tarjetas o certificados de sostenibilidad** que cuantifican y ponen sobre el papel características de los edificios, de otra forma difícilmente visibles, permite la valorización de estas técnicas y logros. Gracias a esto, la arquitectura sostenible deja de percibirse como una solución solo ambiental para adquirir también una dimensión económica (se puede aumentar el valor de un edificio, solicitar ayudas, reducciones de impuestos si así lo ha establecido el gobierno, etc.) y social (creación de espacios verdes valorados, fomento de la accesibilidad de los edificios, etc.). Por lo tanto, las políticas indirectas que se derivan de la evaluación de edificios sostenibles, con tarjetas de sostenibilidad como el programa LEED o el sistema BREEAM, prometen ser fundamentales en el desarrollo presente y futuro de la arquitectura sostenible<sup>291</sup>.

Originalmente, la evaluación de la sostenibilidad se basaba en un único parámetro, relacionado con la energía<sup>292</sup>. En este caso, el problema radicaba en la imposibilidad de analizar un concepto tan amplio como la sostenibilidad desde un único punto de vista, ya que se trata de la combinación de cuestiones ambientales, económicas y sociales, y cada una de ellas posee mayor complejidad que el simple consumo de energía<sup>293</sup>.

En los últimos años, en los países en desarrollo, ha tomado mayor importancia la necesidad de evaluar la totalidad y la complejidad de la sostenibilidad a través de sistemas multi-criterio. Por ejemplo, para conseguir una certificación con el programa LEED se deben cumplir una serie de requisitos obligatorios que hacen referencia a varios aspectos del proyecto arquitectónico, acompañados de otros requisitos opcionales complementarios a los anteriores, que los amplían en algunas cuestiones y permiten tener una visión más completa y amplia de la complejidad de la sostenibilidad de cada edificio o diseño urbanístico<sup>294</sup>.

290 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

291 Berardi, U. 2012.

292 Ibídem.

293 Ibídem.

294 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.





Por lo tanto, es necesario encontrar un equilibrio entre el englobe total de la sostenibilidad y la simplicidad de uso de estos certificados<sup>295</sup> (véase el estándar *Passivhaus*, en el apartado 2.5.3.1), haciéndolos más comprensibles y útiles.

Pero las evaluaciones de la sostenibilidad de un edificio no solo deben conseguir cuantificar, en algún momento concreto, los impactos y el comportamiento ambiental, social y económico de los edificios, sino que es muy importante que se realice este estudio desde un enfoque del ciclo de vida del edificio<sup>296</sup>, ya que un edificio sostenible produce mayores beneficios a lo largo de su vida útil respecto a un edificio convencional, a pesar de que su coste de construcción inicial es superior, por lo general (Figura 2.55). En la actualidad, la tendencia conduce a la introducción de aspectos locales, del entorno del barrio, del emplazamiento o parcela y de la regulación del uso de la energía dentro del estudio de los aspectos ambientales, económicos y sociales<sup>297</sup>.

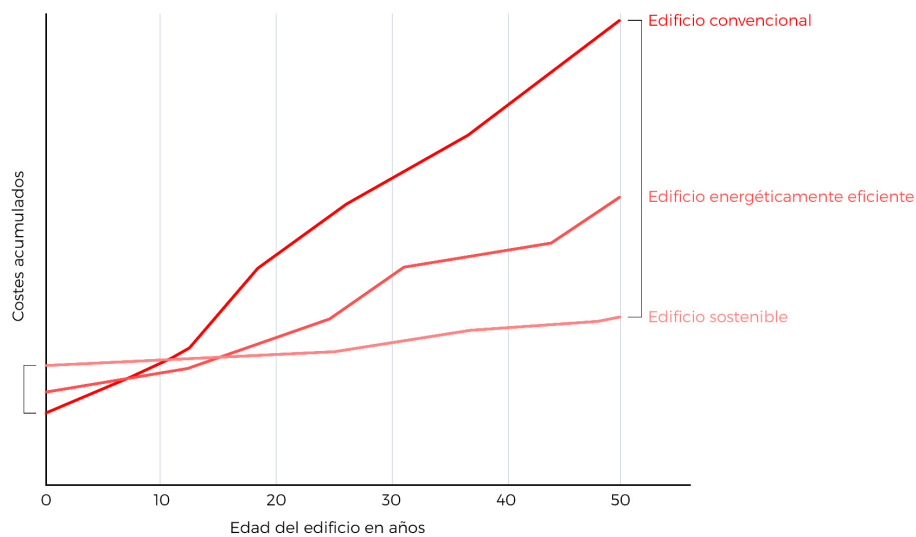


Figura 2.55. Costes acumulados asociados a la vida útil de un edificio convencional, uno energéticamente eficiente y uno sostenible. Se indica el diferencial del coste inicial de construcción de las tres opciones (izq.) y el diferencial del coste acumulado total, una vez llegados al final de su vida útil (dcha.).

### 2.5.3.1 Principales certificados de sostenibilidad

A continuación, se describen los principales certificados o tarjetas de sostenibilidad que existen actualmente en el panorama mundial, y que son de especial relevancia para la evaluación y la difusión de la arquitectura sostenible, sus ventajas y beneficios en el panorama presente y futuro.

Uno de los sistemas más antiguos y extendido, puesto en marcha en 1990 en Reino Unido, es el sistema **BREEAM** (del inglés *Building Research Establishment Environmental Assessment Method*), que se centra en la evaluación de la sostenibilidad y el comportamiento medioambiental de edificios no domésticos, estudiando las siguientes áreas: contaminación; transporte; agua; residuos; innovación; energía; salud y bienestar; uso del suelo y ecología; materiales; y gestión<sup>298</sup> (Figura 2.56).

Otro estándar europeo, de aparición más reciente, y que analiza la eficiencia energética de un edificio y su huella ecológica es el **Passivhaus**, cuyos principios son aplicables principalmente al sector residencial, pero también a edificios comerciales, industriales y de uso público<sup>299</sup>. La fortaleza de este estándar radica en la sencillez de su enfoque: producir edificios de muy bajo consumo energético mediante la combinación del

295 Berardi, U. 2012.

296 AENOR. 2012.

297 Berardi, U. 2012.

298 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

299 Ibídem.



máximo rendimiento térmico y el grado de estanqueidad óptimo de la envolvente<sup>300</sup>. Ejemplo de la sencillez de este estándar son los requisitos que debe cumplir un edificio para que sea certificado como una construcción *Passivhaus*<sup>301</sup>:

- Consumo energético máximo en refrigeración: 15 kWh/m<sup>2</sup>.
- Consumo energético máximo en calefacción: 15 kWh/m<sup>2</sup>.
- Consumo energético máximo total: 120 kWh/m<sup>2</sup>.
- Tasa de filtraciones de aire: < 0,6 renovaciones por hora a 50 Pa.

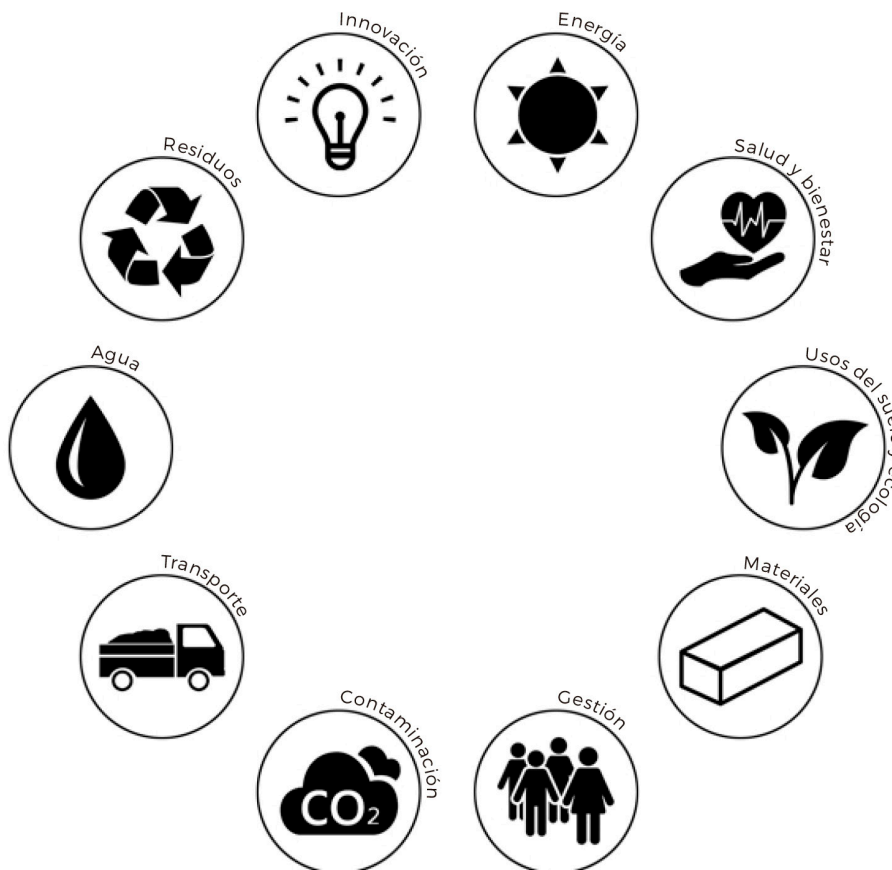


Figura 2.56. Áreas de gestión evaluables en el sistema BREEAM.

Uno de los principales certificados ambientales existentes es el programa **LEED** (del inglés *Leadership in Energy and Environmental Design*). Desde su aparición en Estados Unidos ha ido tomando un papel protagonista en este país, y cada vez más en el panorama mundial. Se evalúan cinco categorías: eficiencia en agua; materiales y recursos; innovación en diseño; energía y atmósfera; calidad ambiental interior; y parcelas sostenibles<sup>302</sup> (Figura 2.57). Su relevancia e importancia actual se deben a su amplia aplicación, ya que además de emplearse en edificios nuevos, también sirve para el análisis sostenible de edificios rehabilitados, o planificaciones urbanas de barrios (donde se estudian diferentes rasgos ecológicos, como la compactidad, la conectividad y las calles peatonales) (Figura 2.58)<sup>303</sup>.

Una alternativa económica y on-line al programa LEED, en el ámbito de los edificios comerciales, es el sistema **Green Globes**, que se centra en el análisis del ciclo de vida del proyecto desde siete enfoques: gestión del proyecto; emplazamiento; energía; agua; recursos; materiales de construcción y residuos; emisiones y efluentes; y ambiente interior<sup>304</sup>.

300 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

301 Ibídem.

302 Ibídem.

303 Ibídem.

304 Ibídem.

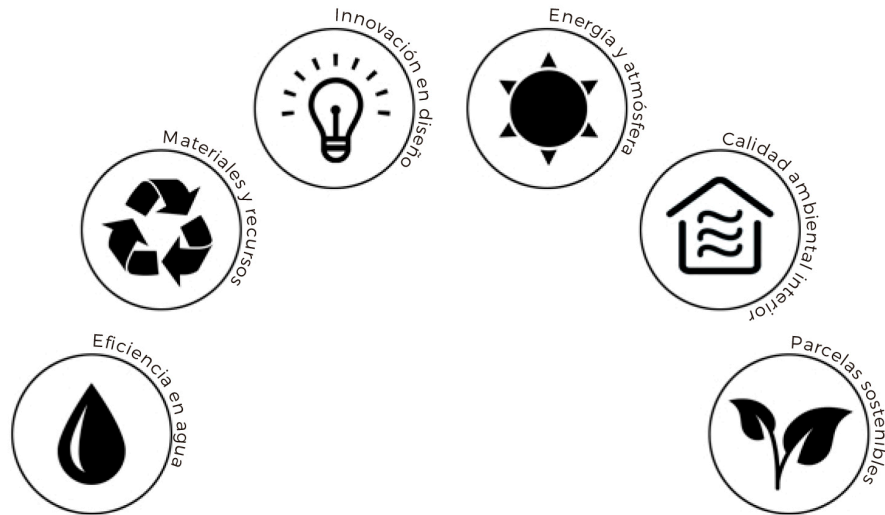


Figura 2.57. Categorías evaluables en el programa LEED.



Figura 2.58. El programa LEED para planificaciones urbanas.

Otro estándar estadounidense, centrado en el ahorro energético, es el Estándar para el proyecto de los Edificios Verdes de Alto Rendimiento, generalmente conocido como el **Estándar 189.1**<sup>305</sup>. Además del ahorro energético, también evalúa unos requisitos mínimos relacionados con el emplazamiento, la eficiencia de uso del agua, la calidad del ambiente interior, el impacto en la atmósfera, los materiales, el uso de recursos y la planificación de las obras<sup>306</sup>.

En el campo del proyecto y la construcción de viviendas, un estándar muy empleado, también en Estados Unidos, es el sistema **HERS** (del inglés *Home Energy Rating Systems*), centrándose en la evaluación del ahorro energético, pero que contiene una serie de requisitos que tienen que ver con la calidad del ambiente interior<sup>307</sup>.

Uno de los estándares más recientes es el **Living Building Challenge**, que al igual que el programa LEED, va dirigido a evaluar proyectos de cualquier escala, desde edificios hasta proyectos urbanísticos o paisajísticos<sup>308</sup>. Se centra en la búsqueda del gasto cero de agua y energía y el procesamiento integral de residuos *in situ*, aunque también considera aspectos de emplazamiento, selección de materiales y salud<sup>309</sup>.

305 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

306 *Ibidem*.

307 *Ibidem*.

308 *Ibidem*.

309 *Ibidem*.



#### 2.5.4 Las cubiertas planas ajardinadas en España: marco normativo actual

Se ha observado, por lo tanto, que las políticas públicas y el desarrollo y ampliación del uso de tarjetas o certificados energéticos, combinado con la introducción de la arquitectura sostenible en grandes proyectos emblemáticos y de referencia, se ha convertido, en la actualidad, en el gran motor de la carrera sostenible. En España, el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, presentado por el Gobierno de España en abril de 2021, pretende fomentar la transición verde e iniciar un apoyo activo a la carrera sostenible de la sociedad<sup>310</sup>. Este plan, en el marco director que establece el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) remitido a la Comisión Europea en marzo de 2020, está completamente alineado con los ODS mencionados previamente y las iniciativas emblemáticas (*flagships*) de la UE<sup>311</sup>. En términos generales consta de cuatro ejes transversales, siendo uno de ellos la transición ecológica, que sirven como contexto para diez políticas palanca que pretenden, entre otras metas, conseguir infraestructuras y ecosistemas resilientes y una transición energética justa e inclusiva. Dentro del campo de la arquitectura sostenible, una de las iniciativas emblemáticas (*flagships*) de la UE que más puede interesar es la *Renovate*, que en el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia se incluye dentro de las diez principales políticas palanca mencionadas y se traduce en objetivos como la rehabilitación energética del parque inmobiliario con propuesta de intervenciones integrales, la mejora de la calificación y ahorro energéticos en edificios no públicos o la incorporación de nuevas tecnologías en la gestión de la biodiversidad<sup>312</sup>.

El ahorro energético y el uso de fuentes energéticas no contaminantes (carbonneutralidad) son algunas de las principales metas de la arquitectura sostenible en general y las cubiertas ajardinadas en particular. Ello hace que cada vez más el CTE, principal normativa española en regulación de la construcción, concretamente en su **Documento Básico de Ahorro Energético** (DB-HE), establezca parámetros y valores más estrictos que traten de conseguir el edificio de consumo de energía casi nulo, es decir, maximizar en todo lo posible el ahorro energético desde el propio sistema constructivo. Este documento fue aprobado en el Real Decreto 314/2006, de 28 de marzo de 2006<sup>313</sup>, aunque las últimas modificaciones más restrictivas datan de 20 de diciembre de 2019, en el Real Decreto 732/2019<sup>314</sup>. Desde el punto de vista del ahorro energético a conseguir, no ya desde la construcción del propio edificio sino en el diseño de los sistemas de climatización, el **Reglamento de Instalaciones Térmicas de Edificios** (RITE) regula desde el 29 de agosto de 2007, en el Real Decreto 1027/2007, la eficiencia energética de las instalaciones térmicas<sup>315</sup>. Las últimas modificaciones realizadas son de 23 de marzo de 2021, con el Real Decreto 178/2021.

Cabe destacar que esta normativa es de obligado cumplimiento para los edificios de nueva construcción y, en gran parte de las ocasiones, también para rehabilitaciones de edificios. Pero ello no implica que el propietario o usuario de una vivienda esté obligado a rehabilitar, existiendo en el parque de viviendas español actual casi un 60 % de edificios construidos previo a 1980, y que no han sufrido ninguna reforma integral. Esto quiere decir que se mantienen con las prescripciones constructivas de la época. Hasta la segunda mitad del siglo XX no aparecieron los primeros documentos encargados de regular la edificación en España, las *Normas MV*, la mayoría de las cuales se aprobaron entre 1961 y 1976, pero ninguna consideraba el aislamiento térmico de la envolvente. En 1969 se aprobaron las Ordenanzas Provisionales, aplicables a viviendas acogidas al régimen de protección oficial, pero que, aunque contemplaban cierto aislamiento térmico, con una simple cámara de aire se alcanzaban los valores de transmitancia exigidos. La primera norma moderna que exigió aislamiento térmico no llegó hasta diez años después, con la **Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas** (NBE-CT-79), aprobada en 1979. Desde ese momento hasta la aprobación del CTE en 2006 el estándar de componentes de la envolvente térmica de un edificio contaba ya con un material aislante térmico, aunque las exigencias respecto a la demanda energética y el aislamiento eran entre un 25 % y 35 % menores que las establecidas posteriormente en la primera versión del CTE<sup>316</sup>.

310 Gobierno de España. 2021.

311 Comisión Europea. 2020b.

312 Gobierno de España. 2021.

313 IVE. 2011.

314 Ministerio de Fomento. 2022a.

315 IVE. 2011.

316 Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020b.



Por lo tanto, la disminución del consumo energético y la mayor eficiencia del parque de viviendas que plantea el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia se enfoca, claramente, en aumentar el número de rehabilitaciones energéticas de los edificios de viviendas y uso público que se construyeron bajo una normativa energética muy laxa, o inexistente, y que todavía siguen funcionando con la misma solución constructiva. Estas actuaciones se plantean desde la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE 2020), que tiene como objetivos fomentar esta renovación para conseguir un parque inmobiliario, en 2050, con alta eficiencia energética y descarbonizado<sup>317</sup>.

Pero el fomento de la rehabilitación en España se encuentra actualmente enfrentado a varios problemas, siendo uno de ellos el propio clima del lugar. En términos generales, España es uno de los países europeos con menor consumo energético en los hogares, especialmente en calefacción, por lo que el potencial de ahorro energético y económico tras una rehabilitación profunda es mucho menor que en otros países de la UE. Por lo tanto, el ERESEE 2020 pretende fomentar e incentivar la rehabilitación integral de viviendas, ya que la falta de iniciativa derivada del clima, sumado a que el coste de este tipo de intervenciones no es asequible por gran parte de los usuarios de las viviendas, no parecen facilitar la decisión de rehabilitar por parte de los propietarios o inquilinos de los edificios. Una rehabilitación integral de la envolvente del edificio (cerramientos verticales, cubiertas, soleras y carpinterías exteriores) aseguraría por sí misma, sin actuar sobre las instalaciones de la vivienda, una reducción considerable de la potencia térmica necesaria para calefacción. De hecho, el propio documento considera que, del total de la inversión para la rehabilitación integral de la vivienda, entre el 31 % y el 61 % se recuperará gracias al ahorro energético generado y el 33 %, aproximadamente, será inversión pública, por lo que la inversión privada será menor y el fomento de la rehabilitación mayor<sup>318</sup>.

A nivel autonómico, en la Comunidad Valenciana el Instituto Valenciano de la Edificación (IVE) publicó en 2015 un *Estudio del Potencial de ahorro energético y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la Comunitat Valenciana*, con la intención de impulsar la rehabilitación energética<sup>319</sup>. Además, en abril de 2021 se aprobó la convocatoria de ayudas públicas para mejorar las condiciones interiores de los edificios en el marco del *Pla Renhata*<sup>320</sup>.

#### 2.5.4.1 Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE)

Una vez realizado el contexto normativo actual, el documento de mayor relevancia, tanto en obra nueva como en rehabilitación, en relación con el ahorro de energía y el control de la demanda energética en edificios a través del sistema constructivo, es el **Documento Básico de Ahorro Energético** (DB-HE), cuyos requisitos y exigencias básicas se establecen en el artículo 15 de la parte I del CTE<sup>321</sup>. De acuerdo con el CTE “el objetivo del requisito básico “Ahorro de energía” consiste en conseguir un uso racional de la energía necesaria para la utilización de los edificios, reduciendo a límites sostenibles su consumo y conseguir, asimismo, que una parte de este consumo proceda de fuentes de energía renovable, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento”<sup>322</sup>.

Resultan de importante relevancia todos los apartados del DB-HE, aunque cabe destacar la sección 1, que hace referencia a la limitación de la demanda energética, ya que se centra en el control de las ganancias y pérdidas del edificio a través de su envolvente, en función de su diseño y ejecución. De acuerdo con el CTE, la limitación de las necesidades energéticas del edificio se regula mediante el diseño de una “envolvente de características tales que limite las necesidades de energía primaria para alcanzar el bienestar térmico, en función del régimen de verano y de invierno, del uso del edificio y, en el caso de edificios existentes, del alcance de la intervención”<sup>323</sup>.

317 Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020b.

318 *Ibidem*.

319 IVE. 2015; Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020b.

320 Vicepresidencia Segunda y Consejería de Vivienda y Arquitectura Bioclimática. 2021.

321 Ministerio de Fomento. 2022a.

322 *Ibidem*.

323 Ministerio de Fomento. 2022a.



Para el cálculo de la demanda energética de un edificio se necesitarán conocer, en primer lugar, las sollicitaciones exteriores, en función del clima, a través de datos como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar global<sup>324</sup>. Por otro lado, se debe conocer las sollicitaciones interiores y condiciones operacionales, que depende de la carga térmica debida a fuentes internas de calor en un espacio. Y, por último, del nivel de ventilación que se establezca para las diferentes estancias, al igual que las propiedades térmicas de los elementos de la envolvente<sup>325</sup>.

Las características de los elementos que componen la envolvente térmica de un edificio deben evitar las descompensaciones térmicas en los espacios habitables, a la vez que se limitarán las condensaciones intersticiales (regulado en el *Documento de Apoyo DB-HE/2*<sup>326</sup>) y las superficiales (regulado en el *Documento Básico de Salubridad, DB-HS*)<sup>327</sup>.

En la sección 0 del DB-HE se establece la limitación del consumo energético total para edificios de uso residencial, tanto en nuevas construcciones como en reformas o rehabilitaciones, haciendo referencia no solo a limitaciones en el consumo de energía primaria total (Tabla 2.6), sino también de energía primaria no renovable (Tabla 2.7)<sup>328</sup>.

LÍMITE CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA TOTAL (kWh/m <sup>2</sup> año)						
Edificios de uso residencial	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	40	50	56	64	76	86
Cambios de uso a residencial privado y reformas	55	75	80	90	105	115

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25.

Tabla 2.6. Límite de consumo de energía primaria total (kWh/m<sup>2</sup> año) en edificios de uso residencial.

LÍMITE CONSUMO DE ENERGÍA PRIMARIA NO RENOVABLE (kWh/m <sup>2</sup> año)						
Edificios de uso residencial	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Edificios nuevos y ampliaciones	20	25	28	32	38	43
Cambios de uso a residencial privado y reformas	40	50	55	65	70	80

En territorio extrapeninsular (Illes Balears, Canarias, Ceuta y Melilla) se multiplicarán los valores de la tabla por 1,25.

Tabla 2.7. Límite de consumo de energía primaria no renovable (kWh/m<sup>2</sup> año) en edificios de uso residencial.

La determinación de las zonas climáticas, tanto de verano (1-2-3-4) como de invierno (α-A-B-C-D-E), se puede realizar con el propio documento DB-HE<sup>329</sup>. Por ejemplo, en base a esta clasificación, València sería zona climática B3, por lo que su límite de demanda de energía primaria total, para uso residencial, sería de 56 kWh/m<sup>2</sup>año en caso de ser un edificio de nueva construcción y de 80 kWh/m<sup>2</sup>año en el caso de cambios de uso a residencial o reformas. Su límite de demanda de energía primaria no renovable sería, en cambio, de 28 kWh/m<sup>2</sup>año en caso de ser un edificio de nueva construcción y de 55 kWh/m<sup>2</sup>año en el caso de cambios de uso a residencial o reformas.

En cuanto a la transmitancia térmica y la permeabilidad al aire de huecos y zonas opacas de la envolvente se establecen valores máximos que no se pueden superar<sup>330</sup>. En el caso de los límites de permea-

324 Ministerio de Fomento. 2017.

325 Ministerio de Fomento. 2022a.

326 Ministerio de Fomento. 2013.

327 Ministerio de Fomento. 2022a.

328 Ibídem.

329 Ibídem.

330 Ministerio de Fomento. 2022a.



bilidad al aire de los huecos, estos se definen también en función de la zona climática de invierno<sup>331</sup>, y se corresponden, en todos los casos, a la clase 2 ( $\leq 27 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) y a la clase 3 ( $\leq 9 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ ) de la norma UNE-EN 12207:2017<sup>332</sup> (Tabla 2.8). También se limitan, en la última actualización del documento, los intercambios de aire, con una presión diferencial de 50 Pa, para edificios de uso residencial privado con una superficie útil superior a  $120 \text{ m}^2$ <sup>333</sup> (Tabla 2.9).

LÍMITE PERMEABILIDAD AL AIRE ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ )						
	Zona climática de invierno					
	$\alpha$	A	B	C	D	E
Permeabilidad al aire de huecos ( $Q_{100, \text{lim}}$ ) *	$\leq 27$	$\leq 27$	$\leq 27$	$\leq 9$	$\leq 9$	$\leq 9$

\* La permeabilidad indicada es la medida con una sobrepresión de 100 Pa ( $Q_{100}$ ).

La permeabilidad del hueco se obtendrá teniendo en cuenta, en su caso, el cajón de persiana.

Tabla 2.8. Límite de permeabilidad al aire ( $\text{m}^3/\text{hm}^2$ ) de los huecos de la envolvente.

COMPACIDAD $V/A$ ( $\text{m}^3/\text{m}^2$ )	$n_{50}$
$V/A \leq 2$	6
$V/A \geq 4$	3

Los valores límite de las compacidades intermedias ( $2 < V/A < 4$ ) se obtienen por interpolación.

Tabla 2.9. Valor límite de la relación del cambio de aire con una presión de 50 Pa,  $n_{50}$ .

En la última actualización del DB-HE los puentes térmicos, como las puertas, se incluyen en las limitaciones de transmitancia térmica definidas por la normativa, como se puede observar en la tabla 2.10, aunque para el estudio del comportamiento higrotérmico concreto de estos puentes térmicos se debe emplear el Documento de Apoyo DB-HE/3<sup>334</sup>. La norma UNE-EN ISO 10211 define el puente térmico como aquella parte del cerramiento de un edificio donde la resistencia térmica normalmente uniforme varía significativamente debido a penetraciones de materiales con diferente conductividad térmica, un cambio de espesor o juntas entre paredes, suelos o techos<sup>335</sup>. Los puentes térmicos no solo suponen un peligro de aumento de la demanda energética, sino que también son puntos con mayor riesgo de formación de moho debido a las condensaciones superficiales causadas por la disminución de temperatura de las superficies interiores en invierno, ya que en estos puntos se producen mayores flujos térmicos<sup>336</sup>.

En el anejo E del DB-HE, también se aportan valores orientativos de transmitancia térmica ( $U$ ) para la envolvente térmica en función de la zona climática, en edificios de uso residencial<sup>337</sup> (Tabla 2.11). Estos valores suelen ser más restrictivos que aquellos mencionados en la sección 1 del DB-HE (Tabla 2.10), por lo que tomar los valores del anejo E para el cálculo de la envolvente térmica implicará estar del lado de la sostenibilidad y el ahorro energético. El cálculo de los diferentes parámetros característicos, desde el punto de vista térmico, de los elementos que componen la envolvente térmica de un edificio concreto (transmitancia térmica, factor de sombra y resistencia térmica total de un elemento multicapa) se puede realizar a través de diferentes métodos simplificados que se indican en el Documento de Apoyo DB-HE/1<sup>338</sup>.

También merece especial mención que en las secciones 4 y 5 del DB-HE se establecen la contribución mínima de energía renovable para ACS o climatización de piscinas cubiertas, y la generación mínima de

331 *Ibidem*.

332 Asociación Española de Normalización (UNE). 2017.

333 Ministerio de Fomento. 2022a.

334 Ministerio de Fomento. 2014.

335 *Ibidem*.

336 *Ibidem*.

337 Ministerio de Fomento. 2022a.

338 Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020a.



energía eléctrica, respectivamente<sup>339</sup>. En el caso de la contribución renovable para ACS, esta se aplica en edificios residenciales, mientras que el ámbito de uso de la sección 5 es de aplicación solo en edificios con uso distinto al residencial privado, y siempre que cumplan las características especificadas en la norma<sup>340</sup>.

U MÁXIMA (W/m <sup>2</sup> K)						
Elementos de la envolvente térmica	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U <sub>M'</sub> , U <sub>S</sub> )	0,80	0,70	0,56	0,49	0,41	0,37
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U <sub>C</sub> )	0,55	0,50	0,44	0,40	0,35	0,33
Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U <sub>T</sub> ) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica (U <sub>MD</sub> )	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Huecos (marco + vidrio + cajón de persiana) (U <sub>H</sub> ) *	3,20	2,70	2,30	2,10	1,80	1,80
Puertas con superficie semitransparentes igual o inferior al 50 %	5,7					

\* Los huecos con uso escaparate en unidades de uso con actividad comercial pueden incrementar el valor de U<sub>H</sub> en un 50 %.

Tabla 2.10. Transmitancia térmica máxima de los elementos de la envolvente térmica (W/m<sup>2</sup>K), según la sección 1 del DB-HE.

U MÁXIMA (W/m <sup>2</sup> K)						
Elementos de la envolvente térmica	Zona climática de invierno					
	α	A	B	C	D	E
Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U <sub>M'</sub> , U <sub>S</sub> )	0,56	0,50	0,38	0,29	0,27	0,23
Cubiertas en contacto con el aire exterior (U <sub>C</sub> )	0,50	0,44	0,33	0,23	0,22	0,19
Elementos en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U <sub>T</sub> )	0,80	0,80	0,69	0,48	0,48	0,48
Huecos (marco + vidrio + cajón de persiana) (U <sub>H</sub> )	2,70	2,70	2,00	2,00	1,60	1,50

Tabla 2.11. Transmitancia térmica máxima de los elementos de la envolvente térmica (W/m<sup>2</sup>K), según el anejo E del DB-HE.

339 Ministerio de Fomento. 2022a.

340 *Ibidem*.





### 3. CARACTERÍSTICAS DE LAS CUBIERTAS AJARDINADAS

Un lugar donde se dan cita un siglo de anhelos y deseos para hacer de la cubierta un espacio donde vivir, habitar y, también, soñar.  
Martínez, A. 2005.

Revitalización en lugar de reconstrucción.  
Telichenko, V., Benuzh, A., Mochalov, I. 2017.

Las cubiertas ajardinadas, como solución sostenible englobada dentro de la nueva orientación de la arquitectura, tienen una serie de características ambientales, sociales y económicas capaces de poner en valor su uso. Además, el sistema constructivo multicapa entorno al cual se estructura este tipo de cubierta permite la interacción de diferentes materiales, cuyas propiedades y funciones son diferentes, particularizando así el comportamiento de las cubiertas ajardinadas.

#### 3.1 CARACTERÍSTICAS AMBIENTALES

Las ciudades actuales presentan una mayor vulnerabilidad al cambio climático que las áreas rurales<sup>1</sup>. Las consecuencias ambientales, sociales y económicas del cambio climático se hacen más patentes en las urbes actuales, en gran parte porque más de la mitad de la población mundial vive en ellas, por lo que los daños infligidos al medio ambiente son mayores, al igual que la cantidad de gente a la que afectan.

Del mismo modo, las propias ciudades pueden influir de manera visible y decisiva en la recuperación del medio ambiente, por lo que la arquitectura sostenible debe aplicarse en ellas de manera todavía más implacable. Actualmente, una de las estrategias de diseño sostenible de los edificios que se está introduciendo con más fuerza en las ciudades son las cubiertas ajardinadas, como ya se ha visto, mejorando la calidad ambiental y reportando beneficios sociales y económicos tanto desde una perspectiva privada como pública<sup>2</sup>. Las cubiertas ajardinadas no solo tienen funciones energéticas a nivel del edificio, controlando las pérdidas y ganancias de calor y las condiciones higrotérmicas del interior del edificio, sino que también funcionan como herramientas de mejora de la salud medioambiental de las ciudades<sup>3</sup>. Podemos indicar, por lo tanto, que, desde una perspectiva ambiental, las cubiertas cumplen funciones medioambientales y microclimáticas respecto al conjunto de la ciudad, y funciones térmicas y energéticas respecto al edificio y el ambiente interior.

Los factores que definirán el comportamiento ambiental de las cubiertas ajardinadas son, de acuerdo con Santamouris<sup>4</sup>, los siguientes:

- **Variables climatológicas:** Las principales variables son la radiación solar y la temperatura ambiente. La primera determina la temperatura de la superficie y, por lo tanto, afecta a los flujos de calor a través de la cubierta, mientras que la temperatura ambiente, por su lado, influye en la diferencia de temperaturas entre la superficie de la cubierta y el aire. Ambas influyen en gran medida en la liberación de calor hacia el exterior por medio de los mecanismos de la evapotranspiración (véase apartado 3.1.2.1). Otras variables a tener en cuenta son la humedad ambiente (a mayor humedad en el aire menor será la evapotranspiración y, por lo tanto, la liberación de energía acumulada por la cubierta) y la velocidad del viento (que influye en el coeficiente de transferencia de calor entre el ambiente y la superficie).

1 Scharf, B., Kraus, F. 2019.

2 Gallardo, N.P., Rogério, A., Neves, G.F., *et al.* 2018.

3 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017.

4 Santamouris, M. 2014.



- **Variables ópticas:** referentes especialmente al albedo y la emisividad de la superficie. Un elevado albedo disminuye la absorción de radiación, por lo que se acumula menor cantidad de calor y disminuye la temperatura de la superficie. Los valores aproximados de albedo para una hoja individual son de 0,3, mientras que, si consideramos el conjunto de la vegetación, el albedo total disminuye y se mantiene entre 0,18 y 0,25, debido al efecto máscara por superposición de hojas<sup>5</sup>. En cuanto a la emisividad, los valores habituales en una cubierta ajardinada se sitúan entre 0,9 y 0,95, en función del tipo de planta. La vegetación absorbe radiación para realizar procesos metabólicos, como la fotosíntesis y para, en caso de disponer de suficiente humedad, activar la evapotranspiración y liberar calor latente (debido al cambio de estado del agua almacenada en el sustrato y la vegetación).
- **Variables térmicas:** el propósito térmico principal en las cubiertas ajardinadas es aumentar su almacenamiento térmico, maximizando la cantidad de calor acumulada, reduciendo el flujo de calor y el pico de temperatura en la superficie interior. De acuerdo con Santamouris<sup>6</sup>, una cubierta ajardinada estándar puede tener valores de acumulación de calor durante el día en torno a 350-500 W/m<sup>2</sup> por hora, y por la noche se torna en valores negativos entorno a los 60 W/m<sup>2</sup>. La transmitancia térmica (U) es la principal propiedad que determina la cantidad de calor transmitido al interior del edificio, y, en las cubiertas ajardinadas, depende en gran medida del espesor del sustrato y de si existe o no una capa de material aislante.
- **Variables hidrológicas:** las pérdidas de calor por evapotranspiración están asociadas a la cantidad de humedad existente en vegetación y sustrato, y a la diferencia de presión de vapor entre la superficie de las hojas o del sustrato y el aire de alrededor.

La disposición de una capa de sustrato y un acabado de vegetación, siempre que se controle el estado de estas (cantidad de agua almacenada, crecimiento de la vegetación, etc.) permite influir en la temperatura ambiente y la cantidad de humedad del aire cercano a la cubierta, al mismo tiempo que posibilita regular y limitar de forma eficaz los flujos de calor y las variaciones interiores de temperatura en una estancia. Es por ello que se considera que las cubiertas ajardinadas aportan beneficios medioambientales al entorno, *hacia afuera*, pero también al interior del edificio, *hacia adentro*. En apartados sucesivos se indicarán en detalle cada uno de estos beneficios, remarcando el papel del conjunto sustrato+vegetación en el funcionamiento del sistema multicapa de cubierta.

### 3.1.1 Beneficios ambientales y microclimáticos

A continuación, se van a detallar las principales características medioambientales y microclimáticas de las cubiertas ajardinadas. Cabe destacar como anotación inicial el hecho de que el impacto climático esperado será menor a una mayor altura de instalación de la cubierta (es decir, sobre edificios más altos)<sup>7</sup>, al igual que también será menor a mayor aislamiento o desconexión (es decir, si hay una red conectada de espacios naturales, entre ellos las cubiertas ajardinadas, el impacto climático esperado será mayor).

#### 3.1.1.1 Mejora de la biodiversidad

El desarrollo urbano inevitablemente destruye hábitats, resultando en una pérdida de biodiversidad<sup>8</sup>. A pesar de que una cubierta ajardinada no puede reemplazar la biodiversidad y la complejidad de los ecosistemas intactos, puede mitigar los cambios producidos por una destrucción completa de estos espacios naturales y promover corredores vivos para insectos y aves en movimiento por las ciudades, al conectar diferentes espacios verdes tanto de dentro como de fuera de la urbe (Infraestructura Verde)<sup>9</sup>. Mediante esta conexión de espacios verdes las cubiertas ajardinadas pueden favorecer el desarrollo de cadenas tróficas más complejas y la recreación de paisajes con mayor cantidad de colores, olores y sonidos<sup>10</sup>.

5 Oke, T.R. 2002.

6 Santamouris, M. 2014.

7 *Ibidem*.

8 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

9 FLL. 2018; Sutton, R.K. 2015; Llopis, M.T. 2010.

10 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.



En este caso, las cubiertas ajardinadas tienen la capacidad de crear un espacio para la vida que no existía antes en el ambiente urbano, creando microhábitats para mejorar la diversidad natural<sup>11</sup>, como por ejemplo en el barrio Ekostaden (véase apartado 2.5.1), donde las cubiertas ajardinadas se aplican a actividades de apicultura, aportando un espacio protegido para las abejas y permitiendo que los habitantes obtengan miel<sup>12</sup>. Cabe mencionar las limitaciones que se encuentran en las cubiertas ajardinadas para la creación de nuevos hábitats, debido a la falta de humedad y/o a las altas temperaturas<sup>13</sup>, o a su propia construcción. Varios estudios demuestran que las cubiertas ricas en variedad de especies vegetales no solo aumentan la biodiversidad, sino que además mejoran otras funciones ecológicas, como por ejemplo la retención de agua de lluvia, el efecto de enfriamiento o la filtración de partículas contaminantes<sup>14</sup>.

Las principales consideraciones a tener en cuenta en el fomento de la biodiversidad, desde un punto de vista de diseño de las cubiertas, son<sup>15</sup>:

- Cantidad de superficie vegetada y composición de la vegetación.
- Relación de la ubicación de la cubierta respecto a hábitats terrestres cercanos, mediante la red de Infraestructura Verde.
- La inclusión de elementos específicos de ciertos hábitats, como troncos, piedras, etc. para la configuración de un mosaico que aporte variedad.

Estos tres factores, en especial el referido a la conectividad de espacios naturales, permite compensar las pequeñas superficies que ocupan las cubiertas ajardinadas en comparación con los ecosistemas intactos, permitiendo que funcionen adecuadamente y se mantengan resilientes al cambio, aceptando la realidad de que los ecosistemas son estructuras vivas complejas y dinámicas<sup>16</sup>. En un caso de desconexión o escaso tamaño de la cubierta, el ecosistema no será capaz de regenerarse, por lo que la biodiversidad, y también el valor social y económico de la cubierta, descenderán<sup>17</sup>.

Dentro de la propia construcción y los materiales de la cubierta, Schrader y Böning<sup>18</sup> definieron tres factores que contribuyen a la biodiversidad: el tipo de sustrato, los cambios que se producen durante el proceso de maduración del sustrato (la edad de la cubierta) y el incremento de la actividad biológica y el contenido orgánico debido a hojas y organismos muertos. La función de los microbios en el sustrato, sinónimo de biodiversidad, resulta de gran importancia en la liberación y la sustitución de nutrientes, hecho que puede permitirnos una reducción en el uso de fertilizantes<sup>19</sup>, minimizando a su vez los trabajos de mantenimiento de la cubierta y aumentando la calidad de la escorrentía de agua de lluvia.

### 3.1.1.2 Reducción del efecto de isla de calor

El efecto de isla de calor o UHI (del inglés *Urban Heat Island*) se produce en los núcleos urbanos debido a la gran cantidad de superficies duras, reflectantes e impermeables existentes, como el asfalto, que funcionan como fuentes emisoras de calor<sup>20</sup>. El comportamiento térmico de la ciudad se modifica<sup>21</sup>, configurando un perfil térmico variable al seccionar la totalidad de la urbe, que puede llegar a marcar una diferencia de 12 °C entre un barrio céntrico de la ciudad, todo cubierto de asfalto, y la periferia que dispone de mayor cantidad de espacios verdes<sup>22</sup>. Uno de los principales factores causantes de este efecto de isla de calor son

11 Van Mechelen, C., Dutoit, T., Hermy, M. 2015; Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

12 Cruz, A.I. 2017.

13 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

14 FLL. 2018.

15 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

16 Comisión Europea. 2014.

17 *Ibidem*.

18 Schrader, S., Böning, M. 2006.

19 Sutton, R.K. 2015.

20 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

21 Gallardo, N.P., Rogério, A., Neves, G.F., *et al.* 2018.

22 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.



las superficies realizadas con materiales no reflectivos, capaces de absorber grandes cantidades de calor durante las horas en las que la radiación solar incide sobre ellas, liberándolo progresivamente pasado un cierto tiempo. Este fenómeno es claramente visible durante la noche, cuando superficies como el asfalto liberan gran cantidad de calor, a pesar de no haber radiación solar, debido a todo el que han acumulado durante el día<sup>23</sup>. Pero el efecto de isla de calor también se produce debido a otros factores, como la menor cantidad de áreas verdes, con una clara reducción de la sombra y la intercepción de la radiación, la reducción de la circulación de aire por los cañones urbanos y la alta producción de calor como residuo de los sistemas de climatización, el tráfico de vehículos motorizados y los procesos industriales<sup>24</sup>. Este aumento de la temperatura, que, de manera generalizada, se produce principalmente en los centros de las ciudades, también implica la aparición de unas nuevas corrientes de aire que arrastran el aire más frío de las afueras hacia el interior de las ciudades, llevando con él la contaminación habitual de las industrias y autopistas situadas en la periferia<sup>25</sup>.

Durante el verano, este aumento de la temperatura del aire en el centro de las ciudades implica un incremento en el uso de los sistemas de refrigeración, lo que conlleva un mayor gasto de energía y una mayor producción de gases contaminantes cuando esta energía empleada en los sistemas de climatización no es sostenible o verde. Esto a su vez aumenta el efecto invernadero y, por lo tanto, la temperatura global del planeta<sup>26</sup>. Se estima que entre el 5 % y el 10 % de la demanda urbana de energía eléctrica se emplea en mitigar los efectos del UHI<sup>27</sup>. Por cada aumento de 1 °C en la temperatura de la ciudad, la demanda eléctrica aumenta entorno al 2-4 %, por lo que, por ejemplo, en Los Ángeles, la temperatura actual ha aumentado en 2,5 °C respecto al 1920, implicando un aumento de la demanda eléctrica en 1500 MW<sup>28</sup>. Se debe considerar, como indican gran cantidad de estudios, que el mayor impacto respecto a la mitigación del UHI mediante el uso de cubiertas ajardinadas se da en climas cálidos y secos<sup>29</sup>, donde el uso de los sistemas de refrigeración va en aumento.

Más allá de un aumento en el consumo energético derivado de los sistemas de refrigeración y la disminución de su eficiencia<sup>30</sup>, las temperaturas elevadas implican también una mayor mortalidad asociada a los golpes de calor y la generación de estrés en ecosistemas acuáticos al calentar el agua de escorrentía que posteriormente llegará a arroyos, ríos, lagunas y lagos<sup>31</sup>.

La aplicación de la cubierta ajardinada como fuente de humectación del ambiente, gracias a la evapotranspiración, y como herramienta de reducción de la temperatura del aire cercano en verano<sup>32</sup>, se debe considerar también desde la perspectiva de la Infraestructura Verde, ya que, sin una configuración geométrica y una interconexión de los elementos verdes de la ciudad, este efecto de reducción del UHI puede ser mínimo, e incluso inexistente<sup>33</sup>. En los estudios realizados por Santamouris<sup>34</sup> se concluyó que el uso a gran escala de las cubiertas ajardinadas podía llegar a reducir la temperatura ambiente entre 0,3 y 3 °C, lo cual no es despreciable. Tiwari *et al.*<sup>35</sup> analizaron también el efecto sobre el UHI de la Infraestructura Verde en la población de Guildford (Reino Unido). Determinaron que la escasa área ocupada por las cubiertas ajardinadas hacía que su influencia en una escala urbana fuera despreciable, mientras que a una escala de vecindario las cubiertas ajardinadas sí que eran capaces de afectar a la temperatura, con disminuciones de 0,142 °C. Estas conclusiones pueden resumirse en la necesidad de que las cubiertas ajardinadas ocupen

23 Vox, G., Maneta, A., Schettini, E. 2016.

24 Campiotti, C.A., Schettini, E., Alonzo, G., *et al.* 2013; Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., *et al.* 2016; Santamouris, M. 2014.

25 Llopis, M.T. 2010.

26 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

27 Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. 2001.

28 *Ibidem.*

29 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

30 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

31 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

32 Britto, C. 2001; Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

33 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

34 Santamouris, M. 2014.

35 Tiwari, A., Kumar, P., Kalaiarasan, G., *et al.* 2021.



mayores superficies y mayor cantidad de azoteas, ya que una baja proporción de cubiertas ajardinadas, o una desconexión entre ellas, hará que su influencia sobre le UHI no sea relevante, tan solo disminuyendo la temperatura cercana a su superficie.

En términos generales, la vegetación es capaz de reducir la temperatura del aire cercano a la superficie de la cubierta, pudiendo alcanzar disminuciones de hasta 0,4 °C durante el día y 0,8 °C durante la noche, de acuerdo con varios estudios<sup>36</sup>. Speak *et al.*<sup>37</sup> compararon la contribución a mitigar el UHI de una cubierta tradicional de hormigón frente a una cubierta ajardinada, midiendo unas temperaturas 1,06 °C más bajas 30 cm por encima de la cubierta con vegetación, en comparación con la de hormigón. Cabe destacar su conclusión respecto a una de las cubiertas ajardinadas cuya capa vegetal quedó dañada, dejando el sustrato desnudo. En este caso el efecto de enfriamiento del aire durante el día disminuyó hasta ser irrelevante, pero seguía funcionando durante la noche, en menor medida, pero llegando a enfriar 0,78 °C de media más que la cubierta tradicional. Las investigaciones de Liu *et al.*<sup>38</sup> mostraron que el poder de reducción de la temperatura del entorno cercano de la vegetación aumentaba con la altura de esta, a la vez que las mejores reducciones se producían en plantas con hojas rojas/púrpuras y se comprobaba que incluso con plantas con una elevada tolerancia a la sequía se podía conseguir un buen control de la temperatura del entorno.

Cabe destacar que las cubiertas ajardinadas no son la única herramienta de la arquitectura sostenible para la reducción del UHI, ya que con albedos iguales o mayores a 0,7, las cubiertas reflectantes (también denominadas *cool roof*<sup>39</sup>) funcionan mejor que las ajardinadas en el momento de máxima incidencia de radiación solar<sup>40</sup>. Esto se debe a que las cubiertas reflectantes reducen la temperatura superficial de la cubierta en base a su alta reflectancia y la emisividad infrarroja<sup>41</sup>. La disposición de láminas sintéticas de FPO o PVC, láminas bituminosas autoprotegidas o acabados poliuretánicos o acrílicos, siempre que sea con colores claros de elevada reflectancia, puede hacer de la cubierta un sistema sostenible capaz de mitigar el UHI<sup>42</sup>.

Yang *et al.*<sup>43</sup> determinaron que las cubiertas reflectantes (en su caso con albedo 0,9) mostraban un mayor potencial de enfriamiento en el clima tropical de Singapur que las cubiertas ajardinadas, en parte debido a que la vegetación y su evapotranspiración liberan calor latente al ambiente. También concluyeron que las cubiertas ajardinadas con riego mostraban un mayor potencial de mitigación del UHI que las cubiertas sin riego, lo cual se debe al contenido de humedad y a el potencial de evapotranspiración.

### 3.1.1.3 Reducción de la contaminación del aire

Tanto el sustrato como la vegetación de los ajardinamientos en la ciudad pueden funcionar como trampas de partículas de polvo (incluyendo las pequeñas partículas sólidas o líquidas, de diámetro entre 2,5 y 10  $\mu\text{m}$ , o  $\text{PM}_{10}$ <sup>44</sup>) y contaminantes del aire (principalmente ozono,  $\text{O}_3$ ; dióxido de nitrógeno  $\text{NO}_2$ ; dióxido de azufre,  $\text{SO}_2$ ; dióxido de carbono,  $\text{CO}_2$ ; y monóxido de carbono,  $\text{CO}$ <sup>45</sup>), ayudando a disminuir, entre otros, el efecto del smog (de la palabra inglesa *smog*, que significa *niebla contaminante*)<sup>46</sup>. En cuanto a la vegetación, su poder de captación de partículas contaminantes (fitorremediación), como el  $\text{CO}_2$ , depende de la especie, funcionando mejor las especies perennes que las de hoja caduca<sup>47</sup>. En términos generales, la vegetación reduce la contaminación de manera directa, al absorber los elementos contaminantes por las hojas y

36 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

37 Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J., *et al.* 2013.

38 Liu, T.-C., Shyu, G.-S., Fang, W.-T., *et al.* 2012.

39 Gutiérrez, B. 2020.

40 Gutiérrez, B. 2020; Santamouris, M. 2014.

41 He, Y., Yu, H., Ozaki, A., *et al.* 2020.

42 Gutiérrez, B. 2020.

43 Yang, J., Kumar, D.I.M., Pyrgou, A., *et al.* 2018.

44 Manso, M., Teotónio, I., Silva, C.M., *et al.* 2021.

45 *Ibidem.*

46 Cruz, A.I. 2017; Vijayaraghavan, K. 2016.

47 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.



descomponerlos en su estructura interna<sup>48</sup>, y de forma indirecta al reducir la temperatura de la superficie, reduciendo la reacción fotoquímica como la del ozono en la atmósfera<sup>49</sup>, y reduciendo los flujos de calor y la temperatura interior del edificio, hecho que implica un menor consumo energético en refrigeración (e igualmente en calefacción en invierno cuando la cubierta limita las pérdidas de calor desde el interior al exterior, más frío)<sup>50</sup>.

A pesar de que se ha demostrado que plantar árboles a cota cero, en el entorno urbano, tiene mayores beneficios de mitigación de la contaminación del aire que el uso de cubiertas vegetales<sup>51</sup> (al igual que también funcionan mejor en la disminución del UHI<sup>52</sup>), debido a la falta de espacio para ubicar zonas verdes en ciudades con altas densidades y ocupación del suelo (véase apartado 2.3.1), una extensión y ampliación en el uso de las cubiertas ajardinadas pueden contrarrestar el mejor comportamiento de los árboles. Un estudio realizado por Wong *et al.*<sup>53</sup> en Zhengzhou (China) muestra que los árboles captan un 87 % del polvo del aire, los arbustos un 11,3 % y el césped un 1,7 %. Aun así, investigaciones relacionadas con el verde de las cubiertas muestran que 1000 m<sup>2</sup> de cubierta ajardinada puede captar aproximadamente 160-200 kg de polvo en un año<sup>54</sup> o 93 m<sup>2</sup> de cubierta ajardinada pueden eliminar hasta 40 kg de partículas contaminantes del aire en un año<sup>55</sup>. Para una comparación más visual, en un año 15 coches producen 40 kg de partículas contaminantes<sup>56</sup>. De acuerdo con datos del Ayuntamiento de Barcelona, un metro cuadrado de cubierta ajardinada puede filtrar 0,2 kg de polvo de aerosoles y partículas de esmog en un año<sup>57</sup>.

Respecto al funcionamiento del sistema de captación de partículas contaminantes, en este caso CO<sub>2</sub>, la propia morfología del elemento vegetal le permite la descomposición de moléculas de CO<sub>2</sub> y agua, mediante la luz, en el fenómeno llamado fotosíntesis<sup>58</sup>. Durante la noche, gracias a la respiración, se libera CO<sub>2</sub> y vapor de agua y se consume oxígeno<sup>59</sup>, pero la liberación de CO<sub>2</sub> se produce en menor medida que su captación.

Autores como Akbari *et al.*<sup>60</sup> o Pandit y Laband<sup>61</sup> identificaron que la captación de partículas contaminantes depende de las condiciones de la vegetación, la posición de la cubierta y las condiciones del aire del entorno. De acuerdo con Oke<sup>62</sup>, también se debe considerar la radiación solar incidente y el estado de crecimiento de la vegetación. En un estado inicial de crecimiento, el flujo de CO<sub>2</sub> aumenta ya que la vegetación crece e igualmente ocurre con el área ocupada por las hojas (LAI) (véase en la figura 3.1 los meses de mayo, junio y julio), mientras que, en épocas más tardías, el crecimiento se estanca y el flujo de CO<sub>2</sub> disminuye (véase en la figura 3.1 los meses de agosto y septiembre). El estrés hídrico y las elevadas temperaturas también afectan a este flujo, ya que se restringe la actividad fotosintética, al igual que ocurre durante el invierno. En la siguiente gráfica (Figura 3.2) se puede observar cómo la concentración de CO<sub>2</sub> en las proximidades de la capa vegetal aumenta por la noche en comparación con el día (ya que durante la noche se libera y durante el día se consume), y en las noches de verano en comparación con las de invierno (cuando la actividad metabólica en general se reduce).

Como se ha mencionado, las condiciones y propiedades de la vegetación afectan en gran medida a su captación de partículas contaminantes, al igual que también influyen a la mitigación del UHI, la reducción de la temperatura superficial de la cubierta o de los flujos de calor a través de ella. El LAI (del inglés *Leaf Area*

48 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

49 Penonić, K. 2016.

50 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

51 Pandit, R., Laband, D.N. 2010.

52 Tiwari, A., Kumar, P., Kalaiarasan, G., *et al.* 2021.

53 Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., *et al.* 2003.

54 *Ibidem.*

55 Penonić, K. 2016.

56 *Ibidem.*

57 Ajuntament de Barcelona. 2015.

58 Britto, C. 2001.

59 *Ibidem.*

60 Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H. 2001.

61 Pandit, R., Laband, D.N. 2010.

62 Oke, T.R. 2002.



*Index*) es la representación de la forma en planta del área cubierta por las hojas, y junto a la altura de esta, la fracción de cubrición, el albedo y la resistencia estomática<sup>63</sup>, son las características más importantes que definen la elección de la especie vegetal para su mayor contribución a los beneficios microclimáticos y/o energéticos.

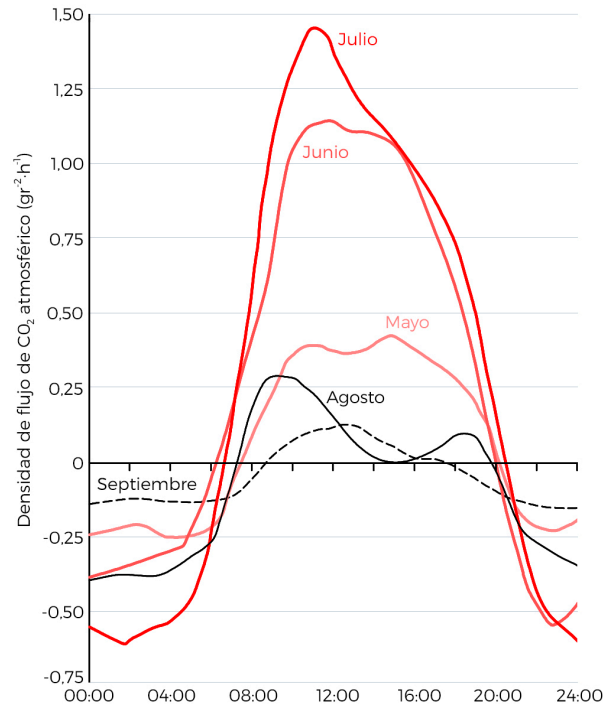


Figura 3.1. Variación diaria del flujo de CO<sub>2</sub> sobre una pradera en los meses de crecimiento.

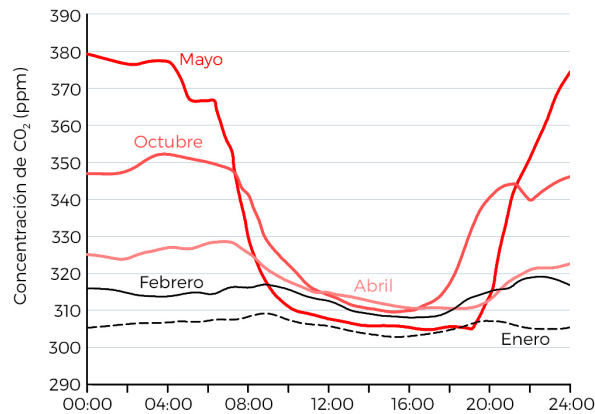


Figura 3.2. Variación diaria de concentración de CO<sub>2</sub> para diferentes meses.

### 3.1.1.4 Reducción de la escorrentía de agua de lluvia

El crecimiento de la población, especialmente agrupándose en ciudades modernas urbanizadas ha producido un aumento de las superficies impermeables, especialmente en la segunda parte del siglo XX, perdiéndose capacidad de absorción de agua en el área urbana, disminuyendo los recursos hídricos como los acuíferos y aumentando las superficies por las que el agua discurre y no penetra<sup>64</sup>. Se aumenta así el riesgo de sufrir grandes escorrentías por las ciudades<sup>65</sup> e inundaciones debido a que el sistema de alcantarillado no está preparado para absorber la gran cantidad de agua que le puede llegar por las superficies impermeables en épocas lluviosas y/o frías, especialmente en contraposición con el flujo de agua bajo o inexistente de los

63 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

64 Huang, C.-L., Hsu, N.-S., Liu, H.-J., et al. 2018.

65 Dietz, M.E. 2007.



periodos secos<sup>66</sup>. El cambio climático todavía acentúa más esta diferencia entre estaciones lluviosas y secas, aumentando aún más la probabilidad de inundaciones<sup>67</sup>.

La cubierta ajardinada se presenta como una herramienta capaz de aumentar la superficie porosa y con posibilidades de absorber agua dentro de la ciudad<sup>68</sup>, ya que actualmente las superficies de cubiertas representan en torno al 40-50 % de las superficies impermeables de las ciudades<sup>69</sup>. El funcionamiento de la cubierta ajardinada permite que una porción de agua igual a la capacidad de almacenamiento del sustrato o WHC (del inglés *Water Holding Capacity*) se retenga, mientras que el exceso de esta cantidad se drenará al sistema de recogida de agua<sup>70</sup>. El agua retenida, con el paso del tiempo, parte se evaporará y parte se empleará por las plantas<sup>71</sup>. Esta agua retenida y, posteriormente, evaporada es la que explica la reducción del volumen de agua de escorrentía, ya que no se produce el drenaje o liberación de agua hacia el sistema de recogida de aguas hasta que no se culmina el WHC del sustrato.

Una revisión de la literatura muestra que el principal factor que influye en la cantidad de escorrentía es el tipo de cubierta, pudiendo llegar a ser del 91 % del agua de lluvia total en cubiertas tradicionales y del 15 % en cubiertas ajardinadas intensivas<sup>72</sup>. Investigaciones llevadas a cabo por Dietz<sup>73</sup> demuestran que el uso de cubiertas ajardinadas puede disminuir de manera directa las escorrentías en un 63 %, aunque se debe destacar que dentro de las cubiertas ajardinadas hay gran variedad de elementos que afectan a la absorción de agua y reducción de la escorrentía, encontrando valores de disminución que varían entre un 60 % y un 100 %<sup>74</sup>. Otros estudios muestran datos similares, como los resultados de Fioretti *et al.*<sup>75</sup> en Italia (cubierta ajardinada con sustrato de 20 cm), que determinaron una media de volumen de agua de lluvia retenido del 68 % y una reducción media del pico de escorrentía del 89 %.

Este aumento de la superficie permeable de la ciudad, mediante el uso de las cubiertas ajardinadas, permite, por lo tanto, mitigar las inundaciones y disminuir las escorrentías de lluvia en la ciudad<sup>76</sup>. Por otro lado, también permiten reducir el pico de escorrentía desde un punto de vista temporal (no solo de cantidad), ya que retrasa el momento de inicio de este debido al tiempo que necesita el sistema de cubierta para absorber el agua, llegar a su límite de contenido de agua en el sustrato (WHC) y distribuir posteriormente el exceso de agua en forma de escorrentía a lo largo de un periodo de tiempo mayor, de manera más constante y con menos picos<sup>77</sup>.

Respecto a la reducción del pico de la escorrentía, Carter y Rasmussen<sup>78</sup> hallaron en sus investigaciones que el pico de descarga, en el caso de eventos lluviosos pequeños (< 25,4 mm), era mucho menor en una cubierta ajardinada respecto a una cubierta tradicional, mientras que este efecto era menos pronunciado en tormentas más grandes. El 57 % de los picos de escorrentía se retrasaban en torno a 10 minutos en la cubierta ajardinada, siendo la media de los retrasos de escorrentía respecto al inicio del evento lluvioso en la cubierta tradicional de 17 minutos y en la cubierta ajardinada la media era de 34,9 minutos. Tanto Simmons *et al.*<sup>79</sup>, como VanWoert *et al.*<sup>80</sup>, corroboran estos datos en sus respectivas investigaciones, observando retrasos del pico en 10 minutos entre una cubierta tradicional y una ajardinada. Bengtsson<sup>81</sup> estudió la

66 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

67 *Ibidem*.

68 Huang, C.-L., Hsu, N.-S., Liu, H.-J., *et al.* 2018.

69 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

70 Berndtsson, J.C. 2010.

71 *Ibidem*.

72 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

73 Dietz, M.E. 2007.

74 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

75 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

76 Huang, C.-L., Hsu, N.-S., Liu, H.-J., *et al.* 2018.

77 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

78 Carter, T.L., Rasmussen, T.C. 2006.

79 Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager, S., *et al.* 2008.

80 VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005a.

81 Bengtsson, L. 2005.





distribución de la escorrentía durante tormentas prolongadas, concluyendo que la escorrentía podía llegar a ir desfasada de la lluvia entre 20 y 30 minutos. Getter *et al.*<sup>82</sup>, en cambio, apreciaron retrasos mínimos en las cubiertas ajardinadas, introduciendo la cuestión de la madurez de la cubierta, que puede afectar a la capacidad de almacenamiento de agua debido a factores de compactación, desarrollo de raíces, etc.

Centrándose ahora en la cantidad de agua de escorrentía, no ya en el retraso temporal del pico, en una cubierta tradicional la relación cantidad de lluvia-escorrentía es lineal, mientras que en el caso de las cubiertas ajardinadas la relación es cuadrática<sup>83</sup>. Investigaciones llevadas a cabo por Mentens *et al.*<sup>84</sup> muestran que, en un supuesto de lluvias anuales de 821 mm, la reducción de la cantidad de escorrentía total en un barrio de la periferia de Bruselas sería de un 2,7 % en el caso de que se sustituyeran un 10 % del total de cubiertas tradicionales por cubiertas ajardinadas extensivas (con espesor de sustrato de 10 cm). Esta reducción sería todavía más determinante en zonas urbanas más densas, como en una zona céntrica de la ciudad, donde sustituyendo un 10 % de las cubiertas tradicionales por un sistema ajardinado, la reducción sería del 3,5 %. Köhler *et al.*<sup>85</sup> determinaron que el almacenamiento de agua conseguido en las cubiertas ajardinadas de Alemania (de entre 5 y 12 cm de espesor) puede reducir la escorrentía de lluvias en un 60-79 %. Observando ejemplos de ciudades como Chicago, Filadelfia o Portland, Scholz-Barth<sup>86</sup> llegó a la conclusión que, de media, en Estados Unidos un 75 % del agua de lluvia se retiene en cubiertas ajardinadas extensivas. Aun así, en ciudades donde el porcentaje de cubiertas de pendiente menor a un 20 % (11°) es muy baja, la instalación de cubiertas ajardinadas que representen un almacenamiento de agua de lluvia representativo no resulta ser una acción muy influyente en la escorrentía de agua. Cristiano *et al.*<sup>87</sup> modelizaron la instalación de cubiertas ajardinadas (extensivas e intensivas) en ciudades como Vancouver (Canadá), Londres (Reino Unido) o Cagliari (Italia), en todas ellas la proporción de cubiertas planas susceptibles de albergar una cubierta ajardinada y permitir reducir la escorrentía de agua de lluvia era muy pequeña, por lo que, en una simulación de larga duración, las cubiertas solo eran capaces de reducir la escorrentía en un 2 %. Los autores plantearon, en ese caso, la combinación del sistema ajardinado con el uso de tanques de recogida de aguas pluviales (a instalar preferiblemente para recoger el agua de cubiertas de pendiente mayor al 20 %) dispuestos en cota cero de la ciudad, consiguiendo así reducciones de la escorrentía entre el 5,5 % y el 17,5 % (en función del clima de cada localización).

Pero la influencia en la disminución del volumen de agua y del retraso del pico de escorrentía no se mantiene siempre constante para todas las cubiertas ajardinadas, ni siquiera se mantiene siempre constante para un tipo de cubierta en concreto. Los principales elementos que influyen en esta reducción del volumen, y del pico de escorrentía, son las precipitaciones anuales, el espesor y las propiedades físicas del sustrato y la vegetación, mientras que la edad de la cubierta, la pendiente y el tamaño no se han mostrado como características determinantes<sup>88</sup>. A continuación, se va a detallar cada uno de estos factores.

Respecto al estudio de las **precipitaciones anuales**, Mentens *et al.*<sup>89</sup> analizaron el comportamiento respecto al agua de lluvia y las escorrentías de una cubierta de grava de 5 cm y una cubierta ajardinada con 10 cm de espesor de sustrato, y ambas con una pendiente del 2 %. La escorrentía se reveló mayor en invierno, con valores del 86 % para la cubierta de grava y del 80 % para la ajardinada, y menor en verano, con un 70 % y un 52 %, respectivamente. Esto se podría explicar por la cantidad de humedad en el sustrato. En el caso del invierno, las lluvias se suceden de manera más constante, dejando poco tiempo entre ellas para que se evapore el agua del sustrato, y las bajas temperaturas tampoco facilitan la evaporación del agua, pudiendo provocar que el WHC del sustrato se vaya reduciendo en eventos lluviosos sucesivos y, por lo tanto, se libera mayor cantidad de agua debido a que hay menor capacidad de almacenamiento en el sustrato y la

82 Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A. 2007.

83 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

84 *Ibidem*.

85 Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F.W., *et al.* 2002.

86 Scholz-Barth, K. 2001.

87 Cristiano, E., Farris, S., Deidda, R., *et al.* 2021.

88 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

89 *Ibidem*.



escorrentía es mayor. Igualmente, Bengtsson<sup>90</sup> comprobó que la reducción de la escorrentía se modificaba de acuerdo con cambios estacionales: durante el periodo septiembre-febrero la disminución era del 34 %, y en el periodo marzo-agosto eran del 67 %. En verano, en cambio, las precipitaciones son menores y más esporádicas, esto sumado a la elevada temperatura del aire y la radiación solar, que permiten una mayor evapotranspiración, el sustrato llega al siguiente evento lluvioso total o parcialmente seco, por lo que su WHC es mayor y la escorrentía de la cubierta ajardinada es menor y tarda más en producirse<sup>91</sup>.

Mentens *et al.*<sup>92</sup> también concluyeron que las cubiertas ajardinadas presentan menor capacidad de retención a mayor intensidad de precipitación. Los datos de Carter y Rasmussen<sup>93</sup> avalan esta conclusión, al encontrar una relación inversa entre la intensidad de la lluvia y el porcentaje retenido: en el caso de tormentas pequeñas (< 25,4 mm) el 88 % se retiene, para tormentas medianas (25,4-76,2 mm) se retiene más del 54 % y para grandes tormentas (> 76,2 mm) se retiene el 48 %; a pesar de que no se estudiaron las condiciones de humedad del sustrato previas a las tormentas. Simmons *et al.*<sup>94</sup> hallaron resultados similares, destacando que, en eventos lluviosos de menos de 10 mm, se retenía toda el agua de lluvia, mientras que para eventos de más de 12 mm las cantidades retenidas variaban entre el 88 % y el 13 % en función del sustrato, el sistema de drenaje y, obviamente, la intensidad de la lluvia y el tamaño del evento.

En relación con la cantidad de **humedad** en el sustrato, este parece ser un factor determinante en la capacidad de almacenamiento de nueva agua de lluvia y la reducción de la escorrentía<sup>95</sup>. En concordancia con lo mencionado en párrafos anteriores, Bengtsson<sup>96</sup> concluyó que las propiedades del sustrato, determinadas en laboratorio, afectaban a la cantidad de agua almacenada. Observó que la escorrentía en las cubiertas ajardinadas no ocurre hasta que no se llega a la capacidad máxima de absorción de agua del sustrato, mientras que la cantidad de agua a almacenar, cuando el sustrato contenía la mayor cantidad de humedad que podía alcanzar (en el caso estudiado, un 45 %) y cuando se encontraba en el estado seco máximo al que podía llegar (15 % de humedad en el sustrato), era de 9 mm y 30 mm de lluvia, respectivamente. Fioretti *et al.*<sup>97</sup> observaron, en sus investigaciones, que, para cualquier evento lluvioso, con periodos secos previos de menos de 96 horas, el volumen de escorrentía reducido era menor al 20 %, mientras que, con periodos secos previos de menos de 12 horas, el volumen reducido era del 0 %. Datos similares aportan las investigaciones de Villarreal y Bengtsson<sup>98</sup>, donde, en condiciones secas, se requería entre 6 y 12 mm de lluvia para la escorrentía inicial, mientras que en condiciones húmedas el inicio de la escorrentía era casi inmediato. En condiciones iniciales secas el agua de lluvia puede ser retenida y retrasada (disminución del volumen de escorrentía, en valores mayores al 40 %<sup>99</sup>, y retraso del pico), mientras que en condiciones iniciales húmedas puede ser como mucho, retrasada (retraso del pico, sin disminuir el volumen de este)<sup>100</sup>.

Respecto al **espesor del sustrato** y sus propiedades, existen un número relevante de estudios e investigaciones que demuestran que un incremento de espesor del sustrato entre 2 y 15 cm no implica un resultado notable en el volumen de agua retenido, pero que las características del sustrato sí que influyen de manera decisiva en la cantidad de agua almacenada en este<sup>101</sup>. En cambio, investigaciones realizadas por Mentens *et al.*<sup>102</sup> sí que encuentran una relación entre el espesor de sustrato y la capacidad de retención: en cubiertas intensivas de 15 cm de espesor de sustrato la disminución de la escorrentía es del 75 %, mientras que en cubiertas de espesor 10 cm se reduce solo hasta el 45 %.

90 Bengtsson, L. 2005.

91 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

92 *Ibíd.*

93 Carter, T.L., Rasmussen, T.C. 2006.

94 Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager, S., *et al.* 2008.

95 Berndtsson, J.C. 2010.

96 Bengtsson, L. 2005.

97 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

98 Villarreal, E.L., Bengtsson, L. 2005.

99 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

100 Villarreal, E.L., Bengtsson, L. 2005.

101 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

102 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.



Aun así, las investigaciones realizadas por Vijayaraghavan y Joshi<sup>103</sup> respecto a las características del sustrato identificaron que el retraso en la aparición de la escorrentía en las cubiertas ajardinadas dependía principalmente del WHC del sustrato, como ya se ha comentado. Graceson *et al.*<sup>104</sup> llegaron a conclusiones similares, al determinar que un mayor WHC se traducía en una mayor retención de agua de lluvia, mientras que el espesor del sustrato tiene una influencia limitada. Como se ha mencionado previamente, el WHC en un momento determinado depende de la cantidad de humedad que ya haya en el sustrato, entre otros factores.

Por lo tanto, la disparidad en los resultados de las investigaciones respecto a la influencia del espesor del sustrato en la reducción de la escorrentía se puede deber a que en algunos casos no se ha analizado la cantidad de humedad del sustrato previa a un evento lluvioso, teniendo solo en consideración la variable del espesor. Mentens *et al.*<sup>105</sup> analizaron la reducción de escorrentía de tres grupos de sustrato (grupo 1: con espesores de < 5 cm; grupo 2: entre 5-15 cm; y grupo 3: > 15 cm) tanto en invierno como en verano. En el periodo cálido, la diferencia de escorrentía entre los grupos 1 y 3 es significativa, siendo el porcentaje de 38 % y 20 %, respectivamente, mientras que en el periodo frío no se encontró una relación relevante entre la escorrentía y la profundidad del sustrato.

Cabe destacar que, de acuerdo con Simmons *et al.*<sup>106</sup>, la capacidad de retención de la cubierta ajardinada se puede ver influenciada no solo por el WHC del suelo, sino también por el desarrollo de las raíces y la biota del suelo, afectando a la porosidad y la capacidad de absorción y almacenamiento de agua, por la estructura de la lámina antiraíces (poros, irregularidades, etc.) y por el área de drenaje.

En relación con la **vegetación**, su capacidad de intercepción de agua, la capacidad de retención y la capacidad de transpiración afectan también a la reducción de la escorrentía. Nagase y Dunnett<sup>107</sup> estudiaron el comportamiento de 12 especies vegetales usualmente empleadas en cubiertas extensivas e identificaron diferentes escorrentías en función del tipo de planta. Las especies cespitosas se hallaron más efectivas para reducir la cantidad de agua de escorrentía, seguidas por las forbias y el *sedum*. También sugirieron que la estructura de la planta influenciaba en la escorrentía, relacionando una estructura con tallos altos y mayor diámetro con una mayor reducción, e igualmente ocurre con la capacidad tapizante, ya que una mayor cobertura permite un control más efectivo del agua de lluvia. Hay más estudios que confirman que las especies *sedum* son unas de las que generan mayores reducciones de volumen de escorrentía<sup>108</sup>, mientras otros sugieren que este mejor control del agua de lluvia se debe al aporte de agua que necesita la vegetación (mayor reducción con especies que necesitan aporte mínimo de agua, como *sedum* y suculentas)<sup>109</sup>.

Otros estudios demuestran también la influencia de la vegetación en la retención de agua, especialmente en periodos con poca disponibilidad de agua y altas temperatura<sup>110</sup>. VanWoert *et al.*<sup>111</sup> determinaron a partir de sus investigaciones que las cubiertas ajardinadas con vegetación retienen un 60,6 % del agua de lluvia, mientras que un sistema solo con sustrato retiene el 50,4 % y en el caso de que el sustrato sea grava de balasto (solo material inorgánico), la retención bajaba hasta un 27,2 %. Wolf y Lundholm<sup>112</sup>, en sus investigaciones, sugirieron que disponer diferentes especies vegetales en una misma cubierta ajardinada podría optimizar las pérdidas de agua en el sustrato, ya que cada especie tiene unas necesidades hídricas distintas, mejorando así el consumo de agua y aumentando el WHC del sustrato en posteriores eventos lluviosos.

103 Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M. 2014.

104 Graceson, A., Hare, M., Monaghan, J., *et al.* 2013.

105 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

106 Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager, S., *et al.* 2008.

107 Nagase, A., Dunnett, N. 2012.

108 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

109 VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005a.

110 Berndtsson, J.C. 2010.

111 VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005a.

112 Wolf, D., Lundholm, J.T. 2008.



La **pendiente** de la cubierta merece una mención especial, ya que su influencia no queda clara en la reducción de la escorrentía<sup>113</sup>. Mientras varios estudios no encuentran relación entre la inclinación de la cubierta y la escorrentía<sup>114</sup>, VanWoert *et al.*<sup>115</sup> investigaron la influencia de la inclinación en la retención de agua, pero tratando también la intensidad de las lluvias. En general, para lluvias ligeras, las cubiertas ajardinadas con pendientes entre el 2 % y el 6,5 %, y con un sustrato de 4 cm, mostraron una retención del 98 % y del 90 %, respectivamente. En cambio, para lluvias intensas, ambas cubiertas retuvieron un 80 %. Esto parece sugerir que, en el caso del estudio de la pendiente, los datos no acaban de ser esclarecedores ya que la retención depende en gran medida también de la intensidad del evento lluvioso.

Siguiendo la misma línea, Villarreal y Bengtsson<sup>116</sup> hallaron que la inclinación influenciaba en la retención de agua, en combinación con la intensidad de las lluvias: para un evento lluvioso concreto, la retención disminuye conforme aumenta la pendiente, mientras que, para una pendiente en concreto, la retención es mejor para eventos de baja intensidad. Para una pendiente del 2 % se obtuvo el doble de retención de agua comparado con una cubierta del 14 %, pudiendo retener hasta 15 mm de lluvia en una cubierta horizontal en condiciones inicialmente secas. Getter *et al.*<sup>117</sup> estudiaron la capacidad de retención de las cubiertas extensivas en función de la intensidad de las lluvias y la pendiente, llegando a conclusiones similares. Las peores retenciones (76,4 %) se producían en pendientes pronunciadas (25 %), mientras que las mejores (94 %) se producían en las pendientes poco pronunciadas (2 %). En cuanto a la intensidad de las lluvias, la retención de agua era mayor para las lluvias ligeras (94 %) y menores para las lluvias intensas (63 %).

#### 3.1.1.4.1 Control mejorado de la escorrentía de tormentas mediante SUDS/BMP y LID

Una vez ya son conocidos los factores influyentes en la capacidad de disminución del volumen de agua de escorrentía y su pico, cabe destacar como este fenómeno puede emplearse a nivel de organización urbana para disminuir el riesgo de inundaciones. Carter y Jackson<sup>118</sup> analizaron el posible beneficio global del establecimiento de una red de cubiertas ajardinadas en Athens (Georgia, Estados Unidos), donde las cubiertas representan el 15,9 % del área total, y el 29,5 % de las superficies impermeables. Las cubiertas ajardinadas propuestas (con sustrato de 7,6 cm de espesor) se emplearon como sistema **SUDS** (Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible), o **BMP** (del inglés *Best Management Practices*) de control de agua de tormentas. Los autores concluyeron que la propuesta solo con cubiertas ajardinadas no podía aportar un control completo del agua de tormenta, por lo que se necesitaba de un sistema combinado de diferentes herramientas SUDS. Esto se debe a que las cubiertas ajardinadas funcionan mejor en la reducción del volumen total de escorrentía, pero no tanto en el caso de la reducción del pico de agua de tormenta (ya que, en lluvias intensas, como se ha indicado previamente, se sobrepasa el WHC y el agua *rebose* de las cubiertas)<sup>119</sup>.

- **SUDS/BMP**

Los SUDS pretenden reproducir de la manera más fiel posible el ciclo hidrológico natural del agua, tratando de eliminar o minimizar las necesidades de depuración de la escorrentía de agua de lluvia almacenada o infiltrada en el terreno<sup>120</sup>. Las tipologías existentes de SUDS, que también forman parte de la Infraestructura Verde, son las cubiertas ajardinadas, los pavimentos drenantes, las franjas drenantes, los pozos o zanjas de infiltración, los depósitos de detención o de infiltraciones y los estanques de retención o humedales<sup>121</sup>. Una ventaja de las cubiertas ajardinadas dentro de los SUDS, frente a los canales o pozos, es que se instalan en espacios sin uso actual, sin limitar el espacio libre disponible en la cota cero de las ciudades<sup>122</sup>.

113 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

114 Bengtsson, L. 2005; Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

115 VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005a.

116 Villarreal, E.L., Bengtsson, L. 2005.

117 Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A. 2007.

118 Carter, T., Jackson, C.R. 2007.

119 Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, A., Bengtsson, L. 2004.

120 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

121 *Ibidem*.

122 Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, A., Bengtsson, L. 2004.



Mediante el uso de SUDS, especialmente en el caso de que se empleen diferentes tipologías combinadas (como concluyeron Carter y Jackson<sup>123</sup>), no solo se mejora el control del agua de lluvia en un área determinada, sino que también se mejora el funcionamiento del sistema de alcantarillado<sup>124</sup>. Esto se percibe con mayor intensidad en los casos en que el sistema de recogida de aguas es unitario, ya que el sistema de alcantarillado pasará a recoger principalmente aguas residuales, y el aporte de aguas pluviales será mínimo. Esta disminución en la presión del sistema de alcantarillado, especialmente en épocas lluviosas, ha sido la base para diferentes ayudas o subvenciones por parte de la administración pública para la instalación de cubiertas ajardinadas (véase apartado 2.5.1)

Un ejemplo del uso conjunto de diferentes tipologías SUDS es la iniciativa *Ekostaden* en el barrio de Augustenborg (Malmö, Suecia). Como ya se ha mencionado en el apartado 2.5.1, en 1998 se realizó una transformación con la intención de gestionar el agua de lluvia de manera más sostenible<sup>125</sup>. Se emplearon diferentes elementos como cubiertas ajardinadas, pozos o canales, con la intención de desconectar la recogida de agua de lluvia del sistema de alcantarillado unitario existente<sup>126</sup>. La creación de un nuevo sistema tradicional de alcantarillado solo para la recogida de aguas pluviales podría haber generado problemas como el cruce de tuberías o los movimientos de tierra indeseados, por lo que se optó por un diseño en base a SUDS, que permitió minimizar la escorrentía de agua en la zona, conservar espacio abierto en la cota cero (gracias a la implementación de la vegetación en las cubiertas) y controlar la circulación y depósito del agua de lluvia<sup>127</sup>.

- **LID.**

El Desarrollo de Bajo Impacto, o LID (del inglés *Low Impact Development*), es otro sistema de control y reutilización sostenible del agua de lluvia. Esta alternativa de diseño contra tormentas se encuentra basada en la bioretención, los pavimentos drenantes y otros<sup>128</sup>. El proyecto piloto data de 1999, en Maryland, y la intención principal del LID es conseguir un diseño más cuidado a lo largo de todas las fases del planeamiento urbano, con la intención de preservar la función natural hidrológica del emplazamiento en cuestión y absorber contaminantes<sup>129</sup>. Las cubiertas ajardinadas se pueden implementar en el LID, pero al igual que se ha mencionado anteriormente, es recomendable integrar varios sistemas a varias escalas<sup>130</sup>.

### **3.1.1.5 Mejora de la calidad del agua de escorrentía de lluvia**

Otra característica importante, relacionada con la escorrentía del agua de lluvia, es la mejora de su calidad gracias al uso de cubiertas ajardinadas. La calidad del agua se determina en función de la calidad de la fuente de agua, por un lado, y de la exposición a contaminantes en su movimiento por las superficies construidas y el suelo, por otro<sup>131</sup>. Respecto a la fuente de agua, en este caso el agua de lluvia se considera que no está contaminada, aunque puede ser ácida y/o contener cantidades relevantes de nitratos<sup>132</sup>. Por lo tanto, el agua de lluvia se contamina principalmente durante la escorrentía, al arrastrar partículas contaminantes de las superficies por las que discurre, como metales pesados, hidrocarburos del petróleo, pesticidas, sólidos suspendidos, nutrientes y/o microorganismos patógenos<sup>133</sup>. Las cubiertas tradicionales acumulan más contaminación en su superficie que las ajardinadas, por lo que la escorrentía de agua de lluvia en una cubierta ajardinada intensiva puede llegar a contener 3 veces menos plomo, 1,5 veces menos zinc, 3 veces menos cobre y 2,5 veces menos cadmio que la escorrentía de una cubierta plana tradicional<sup>134</sup>.

123 Carter, T., Jackson, C.R. 2007.

124 Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, A., Bengtsson, L. 2004.

125 Llopis, M.T. 2010.

126 Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, A., Bengtsson, L. 2004.

127 *Ibídem*.

128 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017.

129 *Ibídem*.

130 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

131 Berndtsson, J.C. 2010.

132 *Ibídem*.

133 *Ibídem*.

134 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.



Este mejor comportamiento de las cubiertas ajardinadas se debe a sus capas y funcionamiento, que limitan las cantidades de contaminantes en el agua de escorrentía gracias a que disminuyen la cantidad de partículas que se acumulan en la superficie, aunque puede suceder que, debido a un mal mantenimiento o un uso excesivo de fertilizantes, aumente peligrosamente la cantidad de nitrógeno, fósforos o metales pesados en el agua de escorrentía de las cubiertas ajardinadas<sup>135</sup>. Para evitar este hecho, especialmente en aquellos casos en que el agua de recogida se pretenda emplear para otros usos<sup>136</sup>, se deben tener en consideración diferentes factores de las cubiertas ajardinadas que pueden determinar una mayor o menor calidad del agua: tipo de vegetación, tipo de sustrato, intensidad de la lluvia, proximidad a fuentes contaminantes, tipo de cubierta ajardinada, edad de la cubierta, tipo de lámina drenante, tipo de fertilizantes empleados y composición orgánica del sustrato<sup>137</sup>.

Respecto a la cantidad de **nitrógeno**, varios estudios indican que la concentración de varias formas de nitrógeno es menor en la escorrentía de las cubiertas ajardinadas que en la propia fuente, es decir, el agua de lluvia<sup>138</sup>. Investigaciones realizadas por Berndtsson *et al.*<sup>139</sup> en cubiertas intensivas en Japón revelan que, con un sustrato ligero inorgánico se conseguía un descenso relevante en la cantidad de nitrógeno de la escorrentía. Emilsson *et al.*<sup>140</sup> demostraron una reducción de nitratos y nitrógeno total en cubiertas ajardinadas con una masa vegetal desarrollada, en comparación con sistemas sin vegetación o con pequeños brotes. En cambio, otros estudios encuentran datos que muestran una liberación sustancial de nitrógenos en las cubiertas ajardinadas, aunque cabe destacar que esta mayor concentración se puede deber al tipo de sustrato, la edad de la cubierta y el uso de fertilizantes durante el mantenimiento<sup>141</sup>. Berndtsson *et al.*<sup>142</sup>, en este caso en un estudio de cubiertas ajardinadas en Suecia, encontraron una retención importante de nitrato de nitrógeno en la vegetación y el sustrato, mientras que la cantidad de nitrógeno en forma de amoníaco era menor en la escorrentía, en comparación con el agua de lluvia. En general, se llegó a la conclusión de que la cantidad global de nitrógeno que se encontraba en el agua de lluvia y en la escorrentía eran muy similares. Por otro lado, Monterusso *et al.*<sup>143</sup> observaron un aumento en la concentración de nitratos de nitrógeno entre el primer y el segundo muestreo que se tomaron 140 y 314 días después de la fertilización, respectivamente. Este aumento de la liberación de nitratos de nitrógeno con el tiempo se puede deber a que estos nitratos se liberan progresivamente con la descomposición de los materiales de abono. También estudiaron la concentración en función del sistema de drenaje y el tipo y espesor de sustrato, comprobando que en un sistema de menor espesor la liberación de nitrógeno era mayor debido a que los nitratos de nitrógeno son más fácilmente lixiviables en sustratos poco profundos (la concentración en la escorrentía de un sustrato de 2 cm de espesor era de 22,7 ppm, mientras que, en un sustrato de 10 cm, era de 0,22 ppm).

La cantidad de **fósforo** en la escorrentía de agua de lluvia de una cubierta ajardinada también se ve afectada por la cantidad de nutrientes en el sustrato, debido al uso de compost o fertilizantes artificiales, ya que la concentración de fósforo en el agua de lluvia es muy pequeña<sup>144</sup>. Diferentes estudios han constatado que casi todo el fósforo se libera en forma de fosfatos, y que en cubiertas de más de 2-3 años ya no se altera sustancialmente la calidad del agua por contenido de fósforo<sup>145</sup>. Köhler *et al.*<sup>146</sup> estudiaron la reducción de fosfatos durante 4 años, para una cubierta ajardinada, comprobando una reducción anual del 26 % el primer año y del 80 % el cuarto. Investigaciones realizadas en el *Worcester Polytechnic Institute* (Massachusetts, Estados Unidos) confirman que hay una mayor concentración de fósforo en las escorrentías de las cubiertas ajardinadas en los primeros años posteriores a su instalación, aunque concluyen que este fenómeno no con-

135 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017.

136 *Ibidem*.

137 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

138 Berndtsson, J.C. 2010; Gómez, A.P.-N., Torres, A.M., López, E.P., *et al.* 2015.

139 Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K. 2009.

140 Emilsson, T., Berndtsson, J.C., Mattsson, J.E., *et al.* 2007.

141 Berndtsson, J.C. 2010.

142 Berndtsson, J.C., Emilsson, T., Bengtsson, L. 2006.

143 Monterusso, M.A., Rowe, D.B., Rugh, C.L., *et al.* 2004.

144 Berndtsson, J.C. 2010.

145 Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K. 2009; Berndtsson, J.C., Emilsson, T., Bengtsson, L. 2006.

146 Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F.W., *et al.* 2002.



tinuará con el aumento de edad de la cubierta<sup>147</sup>. Principalmente esto se debe al desarrollo de la vegetación, aunque también se debería profundizar más en la relación entre la edad de la cubierta y la consecuente pérdida de fósforo del sustrato, o la relación con las rutinas de mantenimiento y fertilización<sup>148</sup>. Monterusso *et al.*<sup>149</sup> detectaron en sus investigaciones que las cubiertas ajardinadas con especies tipo *sedum* contenían mayores niveles de fósforo que otras especies vegetales, lo cual corroboran también las conclusiones de Köhler *et al.*<sup>150</sup>, ya que esta mayor concentración se puede deber a que las especies *sedum* contienen menos biomasa, especialmente en fases iniciales del crecimiento. Respecto al desarrollo de la vegetación, Emilsson *et al.*<sup>151</sup> no hallaron una diferencia significativa en la cantidad total de fosfatos y potasio en la escorrentía al comprar cubiertas ajardinadas con la vegetación desarrolladas, con vegetación en brotes o sin vegetación.

La **edad de la cubierta**, como se ha mencionado, es un factor determinante en la concentración de nitrógeno, fósforo o materia orgánica en la escorrentía de las cubiertas ajardinadas. Pero esto no solo se debe al mantenimiento o al crecimiento de la vegetación, ya que los cambios físicos y químicos que se producen en la estructura del sustrato también afectan de forma significativa, como por ejemplo la disolución de sustancias lixiviables en las sucesivas escorrentías, el aumento del contenido orgánico o la modificación de la porosidad del suelo<sup>152</sup>. Getter *et al.*<sup>153</sup> compararon el contenido de materia orgánica y la porosidad del sustrato de una cubierta pasados 5 años, corroborando que la cantidad de ambos se dobló, pasando de un 2 % de materia orgánica a un 4 %, y de un 41 % de porosidad a un 82 % (asimismo, también aumento el WHC del sustrato, de un 17 % a un 67 %). La edad de la cubierta también afecta a la acidificación del sustrato, como comprobaron Schrader y Böning<sup>154</sup>, al estudiar dos cubiertas de edades diferentes: *viejas*, construidas entre 1990 y 1994, y *nuevas*, construidas entre 1998 y 1999. Las cubiertas antiguas mostraron una disminución del pH (acidificación) y un aumento de contenido de carbono orgánico, concluyendo que las modificaciones en la estructura del suelo debido al crecimiento de las raíces de la vegetación y el desarrollo de los colémbolos, podía explicar estos resultados.

Respecto a la **cantidad de pH**, otros estudios, han comprobado un aumento del pH desde valores de 5-6, presentes en el agua de lluvia, a 7-8, en el agua de escorrentía de cubiertas ajardinadas<sup>155</sup>, ayudando así a disminuir o amortiguar la lluvia ácida<sup>156</sup>.

En cuanto a la liberación de **nutrientes**, este hecho, al igual que la concentración de nitrógeno y el fósforo, está directamente conectado con el uso de fertilizante durante el mantenimiento de la cubierta ajardinada<sup>157</sup>. Los fertilizantes convencionales se disuelven muy rápido, generando una concentración inicial de nutrientes muy elevada en el sustrato, por lo que no todos pueden ser absorbidos por la vegetación y la calidad de la escorrentía de agua disminuye al ir cargada de este exceso de nutrientes<sup>158</sup>. Este hecho empeora en el caso de sustratos de poco espesor y con especies vegetales que necesitan poco aporte de nutrientes<sup>159</sup>. Se recomienda, en cualquier caso, pero especialmente en cubiertas extensivas, que se usen fertilizantes CRF (del inglés *Controlled Release Fertilizer*), ya que no se disuelven tan rápido y permiten una distribución de los nutrientes más constante y uniforme en el tiempo, evitando excesos de concentración en el sustrato y asegurando la disposición a largo plazo para la vegetación<sup>160</sup>. Emilsson *et al.*<sup>161</sup> analizaron la ca-

147 Mentens, J., Raes, D., Hermy, M. 2006.

148 Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F.W., *et al.* 2002.

149 Monterusso, M.A., Rowe, D.B., Rugh, C.L., *et al.* 2004.

150 Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F.W., *et al.* 2002.

151 Emilsson, T., Berndtsson, J.C., Mattsson, J.E., *et al.* 2007.

152 Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A. 2007.

153 *Ibidem*.

154 Schrader, S., Böning, M. 2006.

155 Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K. 2009; Li, W.C., Yeung, K.K.A. 2014.

156 Teemusk, A., Mander, Ü. 2007.

157 Emilsson, T., Berndtsson, J.C., Mattsson, J.E., *et al.* 2007.

158 Berndtsson, J.C. 2010.

159 *Ibidem*.

160 *Ibidem*.

161 Emilsson, T., Berndtsson, J.C., Mattsson, J.E., *et al.* 2007.



lidad de la escorrentía en cubiertas ajardinadas donde se emplearon fertilizantes convencionales, observando una elevada concentración de nutrientes después de la fertilización, y en el caso de algunos nutrientes, las cantidades se encontraban en una elevada proporción en la escorrentía hasta 6 semanas después de la fertilización. Brendtsson *et al.*<sup>162</sup> llegaron a la conclusión de que las cubiertas ajardinadas extensivas, una vez establecidas, no afectaban por sí mismas a la calidad del agua de escorrentía, por lo que el mantenimiento y la fertilización se muestra como la única fuente de contaminantes, confirmando la necesidad del uso de fertilizantes CRF.

La concentración de los **metales pesados** en la escorrentía tampoco se ve modificada en el caso de las cubiertas ajardinadas, encontrándose la misma proporción de metales pesados en el agua de lluvia que en la escorrentía<sup>163</sup>. En cambio, sí que se ha observado una reducción en las cargas de metales pesados, como el hierro, plomo o zinc, respecto al agua de lluvia, en el caso de escorrentías pequeñas y lluvias de poca intensidad<sup>164</sup>.

Cabe destacar, respecto a todos los contaminantes del agua de escorrentía, el efecto de la escorrentía inicial o *first flush*. La primera escorrentía posterior a un periodo de relativa sequía, tanto en cubiertas tradicionales y superficies impermeables urbanas como en cubiertas ajardinadas, contienen mayor cantidad de partículas contaminantes que las escorrentías posteriores<sup>165</sup>. Durante los periodos sin lluvias, las superficies de las cubiertas acumulan partículas atmosféricas, restos de hojas, vegetaciones, etc., empeorando la calidad de la primera escorrentía. Brendtsson *et al.*<sup>166</sup> confirmaron estas conclusiones en sus investigaciones, hallando una mayor concentración de ciertos compuestos, como el fósforo, el nitrato de nitrógeno, el zinc o el cobre, en la primera escorrentía. En el caso de las cubiertas ajardinadas este efecto de *first flush* se podía explicar por la acumulación de las partículas contaminantes en el sistema de drenaje y en los poros de mayor tamaño del sustrato, limpiándose en la primera escorrentía.

Otro factor que destacar es la calidad del agua de escorrentía derivada de la fundida de la nieve. En las escorrentías de agua fundida de nieve las concentraciones de elementos contaminantes son más altas debido a que la nieve de la superficie tarda en fundirse aproximadamente un día, durante el cual acumula contaminantes atmosféricos en su superficie<sup>167</sup>. La vegetación también puede favorecer que la nieve se mantenga sobre la superficie más tiempo, permitiendo una mayor acumulación de contaminantes y que la escorrentía tenga menor calidad, pero también añadiendo una capa de aislamiento temporal a la cubierta<sup>168</sup>.

### 3.1.1.6. Reducción acústica ambiental

Por último, otra importante, aunque no tan estudiada, característica medioambiental y microclimática de las cubiertas ajardinadas es su capacidad para reducir la propagación del ruido urbano gracias al alto coeficiente de absorción acústica de la capa de vegetación<sup>169</sup>. Esta función resulta muy atractiva ya que las zonas urbanas producen niveles de ruido superiores al umbral de confort establecido por la OMS en 50 dBA<sup>170</sup>. Aunque hay que remarcar que para que este beneficio pueda ser tenido en consideración es más conveniente, como ya se dijo al principio de este capítulo para la totalidad de las características climáticas, que las cubiertas ajardinadas se instalen sobre edificios bajos, ya que así se consigue que la vegetación esté directamente expuesta a los sonidos urbanos y pueda funcionar como una superficie de absorción más efectiva<sup>171</sup>.

162 Berndtsson, J.C., Emilsson, T., Bengtsson, L. 2006.

163 Berndtsson, J.C., Bengtsson, L., Jinno, K. 2009.

164 *Ibidem*.

165 Berndtsson, J.C. 2010; Berndtsson, J.C., Bengtsson, L. Jinno, K. 2008.

166 Berndtsson, J.C., Bengtsson, L. Jinno, K. 2008.

167 Teemusk, A., Mander, Ü. 2007.

168 Sutton, R.K. 2015.

169 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017; Yang, H.S., Kang, J., Choi, M.S. 2012.

170 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

171 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.





En general, las cubiertas con vegetación pueden reducir la reverberación en aproximadamente 3 dB, a la vez que mejoran la insonorización interior en 5-8 dB, en función del sustrato y solo para frecuencias entre 250-1250 Hz<sup>172</sup>. Diferentes análisis empíricos demuestran que las cubiertas con vegetación aumentan las pérdidas por transmisión acústica (es decir, la capacidad de la cubierta de no transmitir las ondas sonoras) entre 5-13 dB en bajas y medias frecuencias, y entre 2-8 dB en altas frecuencias, remarcando el aumento de estas pérdidas con el aumento de la profundidad del sustrato<sup>173</sup>. Connelly y Hodgson<sup>174</sup> realizaron experimentos en varias cubiertas ajardinadas con diferentes espesores de sustrato, contenido de agua y especies vegetales que confirmaron estos datos, llegando a la conclusión de que las pérdidas de transmisión del ruido, realizadas con mediciones reales en el interior de los edificios, eran mejores que en las cubiertas sin vegetación en 10 y 20 dB en rangos de frecuencia bajos y medios, respectivamente. Aun así, Yang *et al.*<sup>175</sup> concluyeron que el factor más determinante en la absorción acústica de las cubiertas es la forma, concluyendo que el efecto del tipo de sustrato y su espesor es pequeño en comparación con la configuración y geometría general del sistema.

### 3.1.2 Beneficios térmicos y energéticos

El sistema de cubierta ajardinada multicapa se puede asemejar al funcionamiento de un cerramiento horizontal, en el que la principal transferencia de calor se da por conducción, y la transmisión por convección ocurre entre las hojas y sobre la capa vegetal<sup>176</sup>. La radiación solar incidente sobre la capa de vegetación es reflejada en una pequeña proporción<sup>177</sup>, mientras que las plantas absorben gran parte de esta, empleando una parte en procesos fotosintéticos y metabólicos y en mecanismos de evapotranspiración para la regulación de su temperatura<sup>178</sup>. Esta regulación, si se desarrolla completamente, permite que la temperatura de la capa de vegetación se asemeje a la temperatura del aire, gracias a las pérdidas de calor latente hacia el exterior<sup>179</sup>, por lo que se reduce la transmisión de calor a las capas inferiores, al disminuir la temperatura superficial del sistema multicapa de la cubierta ajardinada<sup>180</sup>. Las transmisiones por radiación de la superficie de la cubierta son, por lo tanto, muy moderadas, debido a la menor temperatura superficial en comparación con una cubierta tradicional, siempre y cuando las capas de vegetación y sustrato dispongan de suficiente agua almacenada para perder calor por evapotranspiración<sup>181</sup>.

Los principales mecanismos de la cubierta ajardinada para mejorar el comportamiento térmico son<sup>182</sup>:

- La sombra provista por la capa de vegetación, bloqueando parte de la radiación solar e impidiendo que incida directamente sobre el sustrato, también denominado efecto máscara.
- La evapotranspiración, combinación de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo y la vegetación, que permite enfriar la superficie de la cubierta, limitando tanto las transmisiones de calor a capas inferiores como el efecto de isla de calor urbano.
- La inercia térmica del sustrato, aumentando la masa térmica del conjunto de la cubierta y disminuyendo los flujos térmicos a través de esta.
- El aislamiento térmico adicional aportado por el sustrato, que aumenta a su vez la inercia térmica.

172 Van der Meulen, S.H. 2019.

173 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

174 Connelly, M., Hodgson, M. 2013.

175 Yang, H.S., Kang, J., Choi, M.S. 2012.

176 Britto, C. 2001.

177 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., *et al.* 2010.

178 Britto, C. 2001.

179 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., *et al.* 2010.

180 Britto, C. 2001.

181 *Ibidem.*

182 Cascone, S. 2019.



### 3.1.2.1 Evapotranspiración

En las transmisiones de calor que se producen en una cubierta ajardinada, el factor más importante, después de la radiación, es la evaporación<sup>183</sup>. En el caso particular de la capa de vegetación, la evaporación implica tres procesos: la evaporación del agua dentro de las hojas, la difusión del vapor a la superficie de las hojas (transpiración) y el transporte del calor de la superficie de las hojas al aire<sup>184</sup>. La combinación de estos tres procesos, junto con el proceso de evaporación del agua del sustrato, es lo que se denomina **evapotranspiración**, y permite absorber calor del ambiente cercano, disminuyendo la temperatura ambiente del entorno<sup>185</sup>. Los principales factores que afectan a la evapotranspiración, de acuerdo con Britto<sup>186</sup>, son:

- **Factores climáticos o meteorológicos.** Aquellos directamente relacionados con el proceso de evapotranspiración son la radiación global, la velocidad del aire, la temperatura del aire, de la superficie vegetal y la cantidad de vapor de agua en la atmósfera. Cabe destacar la relevancia de la temperatura de la superficie vegetal, ya que, a mayor temperatura de la hoja, mayor evapotranspiración, en términos general. Tanto el aumento de la velocidad del viento como de las precipitaciones aumenta la evapotranspiración, ya que aumentos de la velocidad del viento de 0,1 m/s a 1m/s implican incrementos entorno al 10-30 % y a mayor humedad en la capa de tierra debido a las lluvias, mayor evaporación del agua del sustrato y agua disponible para la vegetación<sup>187</sup>.
- **Factores propios de la planta.** El tipo de cobertura vegetal (como el albedo de las hojas o su tamaño y densidad) y la altura de la vegetación condicionan la cantidad de energía absorbida y transmitida a capas inferiores o disipada el aire exterior. Por ejemplo, a mayor cantidad de vegetación y mejor cubrición, más enfriamiento por evapotranspiración<sup>188</sup>. Además, la resistencia estomática también influye considerablemente en las pérdidas de calor por evapotranspiración producidas en la capa de vegetación, especialmente en épocas de estrés hídrico.
- **Factores edáficos.** Como pueden ser el contenido de agua en el suelo o el régimen térmico, entre otros. Se debe remarcar que en caso de que la planta no disponga de suficiente agua, la transpiración en concreto se limita, aumentando la temperatura de la superficie vegetal debido a una disminución de la evapotranspiración. Este proceso recibe el nombre de estrés térmico. Normalmente la superficie de las hojas, en un día soleado, se encuentra entre 5-10 °C por encima de la temperatura del aire, a pesar de los mecanismos para disipar el calor, pero en condiciones de estrés térmico puede llegar a estar 20 °C por encima de la temperatura del aire<sup>189</sup>.

En verano, la evapotranspiración que se produce en la vegetación y el sustrato permite enfriar los materiales de la cubierta<sup>190</sup>. Se han realizado varios estudios en base a la relación de la humedad con el papel de la evapotranspiración. Lazzarin *et al.*<sup>191</sup> evaluaron los flujos de calor a través de una cubierta ajardinada al nordeste de Italia en los periodos más secos y húmedos, concluyendo que en la cubierta húmeda se perdía más del doble de calor a través de evapotranspiración que en la cubierta con el sustrato seco. La evapotranspiración adicional que aportaba la cubierta húmeda implicaba dos beneficios: limita el flujo de calor entrante en el edificio y actúa como enfriador pasivo, retirando calor de la cubierta. Este mismo efecto también lo observaron Bevilacqua *et al.*<sup>192</sup> en sus investigaciones en Cosenza (Italia), comprobando que en el periodo de mayo a septiembre los flujos de calor en una cubierta tradicional eran siempre positivo (del exterior al interior del edificio), mientras que con la instalación de una cubierta ajardinada sin aislamiento los flujos eran mayoritariamente negativos, demostrando el efectivo poder de enfriador pasivo de la cubierta ajardinada. Por lo tanto, queda claro la relevancia e importancia en este proceso de pérdida de calor por

183 Britto, C. 2001.

184 Santamouris, M. 2014.

185 Van der Meulen, S.H. 2019.

186 Britto, C. 2001.

187 Santamouris, M. 2014.

188 Van der Meulen, S.H. 2019.

189 Oke, T.R. 2002.

190 Jim, C.Y. 2017.

191 Lazzarin, R.M., Castellotti, F., Busato, F. 2005.

192 Bevilacqua, P., Bruno, R., Arcuri, N. 2020.



evapotranspiración del contenido de humedad y la disponibilidad de agua. En este caso, el diseño de una cubierta ajardinada con o sin riego (autosuficiente) puede implicar diferencias sustanciales en el comportamiento térmico y energético, ya que a menor disponibilidad de agua se reducen la evaporación del sustrato y se limita la evapotranspiración en la superficie de las hojas de las plantas<sup>193</sup>.

A pesar de que la cantidad de humedad suele ser de relevante importancia en la evapotranspiración, la velocidad a la cual se produce este proceso, y el consecuente efecto de enfriamiento, depende también en gran medida del tipo de vegetación<sup>194</sup>. Dentro de las propiedades de la vegetación, el factor más determinante para definir las pérdidas por evapotranspiración, obviando la resistencia estomática que entra en funcionamiento especialmente en épocas de estrés hídrico y térmico, es el LAI. Los picos de pérdidas varían entre 250-550 W/m<sup>2</sup> para índices de LAI de 2 y 7, respectivamente<sup>195</sup>. Por ejemplo, para valores de LAI superiores a 4 y menores o iguales a 2, la evaporación del sustrato representa entre el 5 y el 50 % de la evapotranspiración total, respectivamente<sup>196</sup>. Esto quiere decir, que, a mayores valores de LAI para la vegetación, el aporte de la evaporación y transpiración de la vegetación al valor de evapotranspiración total es mucho mayor que el aporte de la evaporación del sustrato.

Por otro lado, Wolf y Lundholm<sup>197</sup> comprobaron en sus investigaciones la importancia de la constitución de la vegetación en la pérdida de agua por evapotranspiración, siendo sus características morfológicas, anatómicas y fisiológicas las que determinan el movimiento a través del conjunto suelo-planta-atmósfera y la cantidad de agua perdida por evapotranspiración. Por ejemplo, una cubierta con vegetación extensiva, corta y bien regada puede disipar por evapotranspiración cerca de 3 kWh/m<sup>2</sup> durante un día soleado de verano, lo que implicaría hasta un 80 % de la energía total recibida<sup>198</sup>.

### 3.1.2.2 Reducción de los flujos de calor y el consumo energético de climatización

De manera simplificada, en la transmisión de calor en una cubierta ajardinada se debe considerar que ocurren los fenómenos de conducción, convección y radiación<sup>199</sup>. Centrándonos en la capa de vegetación, el balance de energía que se produce en la superficie de la cubierta se representa como una relación entre la radiación solar global ( $R_n$ ), el intercambio de calor por radiación de onda larga ( $Q_{rl}$ ), el calor latente de evaporación ( $Q_e$ ), el calor sensible transferido por convección ( $Q_{cv}$ ) y la energía utilizada en los procesos metabólicos ( $M$ )<sup>200</sup>:

$$R_n + Q_{rl} + Q_e + Q_{cv} + M = 0$$

La radiación solar incidente en la cubierta ( $R_n$ ) se equilibra mediante el flujo de calor sensible (convección) y latente (evapotranspiración), combinado con la conducción de calor que se produce dentro del sustrato y la radiación térmica desde la capa vegetal-sustrato hacia el exterior y hacia las capas inferiores de la cubierta<sup>201</sup>. En este caso, el sustrato, gracias a su gran inercia térmica, acumula calor y retrasa la transmisión de este al interior; mientras que la vegetación funciona como un elemento de sombra y de absorción de parte de la radiación para desarrollar procesos metabólicos. Ambas características, en conjunto, inducen un mayor enfriamiento por evapotranspiración<sup>202</sup>. Cabe destacar que este proceso de pérdida de calor mediante evapotranspiración es el mecanismo fundamental de enfriamiento del sustrato, y en el caso de la vegetación es el segundo factor en la transmisión de calor<sup>203</sup>.

193 Zheng, X., Yang, Z., Yang, J., *et al.* 2022.

194 Wolf, D., Lundholm, J.T. 2008.

195 Santamouris, M. 2014.

196 Britto, C. 2001.

197 Wolf, D., Lundholm, J.T. 2008.

198 Britto, C. 2001.

199 *Ibidem*.

200 *Ibidem*.

201 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

202 *Ibidem*.

203 Britto, C. 2001.



El primer y principal factor de transmisión de calor en la capa de vegetación es la radiación<sup>204</sup>. De forma habitual una cubierta ajardinada es capaz de reflejar entre el 20 % y el 30 % de la radiación solar incidente, mientras que es capaz de absorber el 60 %, quedando un porcentaje menor del 20 % que llegará directamente al suelo<sup>205</sup>. La radiación absorbida por la vegetación se emplea, en un 20 % para los procesos de evapotranspiración, en un 5 % en el proceso de la fotosíntesis, y el resto en el aumento de la temperatura de las hojas (que se compensa con el enfriamiento mediante la evapotranspiración)<sup>206</sup>. Las investigaciones de Eumorfopoulou y Aravantinos<sup>207</sup>, corroboran estos datos, ya que detectaron que, del total de radiación solar incidente, el 27 % era reflejado, el 60 % absorbido por las plantas y el sustrato y el 13 % transmitido al interior de la cubierta.

Los intercambios convectivos determinan, junto a la radiación, el microclima entorno a la vegetación, y se encuentran directamente relacionados con la temperatura del aire<sup>208</sup>. De manera general, una superficie con vegetación pierde calor por convección en verano, cuando la temperatura media del aire es inferior a la temperatura de las hojas, y gana calor por convección en invierno<sup>209</sup>.

Por lo tanto, gracias a la combinación de vegetación y sustrato como revestimiento de la cubierta ajardinada, se consiguen temperaturas en el interior del edificio con menores variaciones diarias y anuales, debido en gran parte a la filtración de la radiación (efecto máscara) que produce la vegetación, los fenómenos de evapotranspiración, el albedo y la inercia térmica del sustrato que permite acumular calor durante el día y enfriarlo por irradiación durante los periodos nocturnos sin radiación solar<sup>210</sup>. Esta base del funcionamiento térmico y energético de la cubierta ajardinada es de relativa importancia en la arquitectura sostenible, ya que en un día de verano la cubierta puede llegar a recibir 2 veces mayor carga térmica que una pared a sur (en el hemisferio norte)<sup>211</sup> y las principales ganancias de calor en el interior, por lo tanto, se producen por la cubierta<sup>212</sup>.

También cabe destacar que la contribución de la cubierta ajardinada a la reducción de la variación de la temperatura interior y a la reducción de consumo energético de los sistemas de refrigeración y calefacción depende de la construcción del propio edificio, ya que, en edificios mejor aislados, la contribución térmica y energética de la cubierta es menor<sup>213</sup>. Las pérdidas de calor que se producen a través de las cubiertas pueden llegar a representar el 70 % del total de energía perdida por la envolvente de un edificio<sup>214</sup>, pero si este se encuentra bien aislado, las pérdidas son menores y la reducción del consumo energético y la mejora del confort térmico del interior se consigue por la propia construcción del edificio, no por las aportaciones de una posible cubierta ajardinada. Por ejemplo, el ahorro potencial gracias a la cubierta ajardinada, respecto a la energía para calefacción es del 45 % en edificios sin aislamiento y del 13 % en edificios con un aislamiento moderado<sup>215</sup>. Es por ello que las cubiertas ajardinadas se recomiendan, especialmente, en la rehabilitación de edificios con malas condiciones térmicas y de aislamiento en la envolvente (véase apartado 3.1.2.2.1).

Por otro lado, las cubiertas ajardinadas no solo contribuyen a la disminución de la temperatura interior (amortiguamiento), sino también al retardo o desfase de la onda térmica. Scharf y Kraus<sup>216</sup> analizaron la temperatura interior bajo una cubierta tradicional, alcanzando los 27 °C a las 12:00 h mientras que, en las dos opciones con cubierta ajardinada, las temperaturas alcanzadas en el interior se reducían a 22 y 23 °C, obteniendo estas máximas a mitad tarde, con un desfase de varias horas.

204 Britto, C. 2001.

205 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

206 Britto, C. 2001.

207 Eumorfopoulou, E., Aravantinos, D. 1998.

208 Britto, C. 2001.

209 *Ibidem*.

210 Britto, C. 2001; Van der Meulen, S.H. 2019.

211 Britto, C. 2001.

212 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

213 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

214 Shao, B., Du, X., Ren, Q. 2018.

215 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., *et al.* 2010.

216 Scharf, B., Kraus, F. 2019.



Respecto al clima, las contribuciones térmicas y energéticas de la cubierta ajardinada también varían. En climas cálidos la reducción de temperatura interior (respecto a las temperaturas medias, máximas y mínimas), el retraso de la temperatura máxima diaria y la disminución del consumo energético de refrigeración se produce gracias a varios factores, entre ellos la filtración de la radiación solar aportada por la vegetación o **efecto máscara**<sup>217</sup>, que depende en gran medida del LAI y la altura de las plantas<sup>218</sup>.

Otro factor que favorece la reducción de ganancias de calor por la cubierta, en el caso de la cubierta ajardinada, son el **aumento de la masa térmica** (determinada por el sustrato y en menor medida por la capa drenante)<sup>219</sup>. Investigaciones llevadas a cabo por Niachou *et al.*<sup>220</sup> en Grecia (clima cálido) revelaron que las cubiertas ajardinadas reducían la energía de refrigeración entre un 2 % y un 48 %, en función del área cubierta, con una reducción de la temperatura interior de, aproximadamente, 4 °C. Investigaciones llevadas a cabo en Madrid (España), analizaron el comportamiento de una cubierta ajardinada en un edificio de 8 plantas durante su ciclo de vida (50 años), mostrando una reducción en más de un 1 % respecto a la energía empleada en el mismo edificio con cubierta tradicional, llegando a reducciones del 6 % en verano<sup>221</sup>. El *National Research Council of Canada* (NRC) construyó, en el año 2000, una instalación experimental de 72 m<sup>2</sup> dividida en una cubierta ajardinada y una cubierta solo con lámina impermeable bituminosa autoprottegida, en el campus de Ottawa (Canadá)<sup>222</sup>. La comparación de ambas cubiertas en los meses cálidos permitió comprobar que la demanda energética media diaria se reducía en los espacios bajo la cubierta ajardinada, ya que los flujos de calor se situaban entre 6 y 7,5 kWh/día, lo que se correspondía con una reducción aproximada del 75 % respecto al flujo de calor a través de la cubierta tradicional. De acuerdo con Jaffal *et al.*<sup>223</sup>, en sus investigaciones en Atenas (Grecia), la temperatura interior en el día más cálido del verano era 2 °C menor con el uso de una cubierta ajardinada, a la vez que se observó una disminución en la demanda de energía de calefacción en invierno y de enfriamiento en verano, respecto a una cubierta tradicional. A una conclusión similar llegaron Kumar y Kaushik<sup>224</sup> en sus investigaciones en la India, donde con el uso combinado de una cubierta ajardinada y un elemento de sombra conseguían una disminución de la temperatura interior en 5,1 °C.

Otro factor de gran importancia es la **humedad disponible** en el sustrato, ya que de ella dependerán sus pérdidas por evaporación y la disponibilidad de agua para que la vegetación crezca de forma adecuada y, además, pueda perder calor por evapotranspiración. En primer lugar, una falta de agua puede aumentar la mortalidad de la vegetación, así como ralentizar su crecimiento y comprometer el poder de cubrición del sustrato, reduciendo el efecto máscara que protege el sustrato, especialmente en climas cálidos, secos y con elevada radiación solar. En segundo lugar, especialmente en este tipo de climas, como el mediterráneo, el diseño de cubiertas ajardinadas sin riego puede suponer una falta de humedad y por lo tanto una reducción drástica de las pérdidas de calor por evapotranspiración y el aumento de la temperatura de las capas de vegetación y sustrato. De acuerdo con las investigaciones de Yazdani y Baneshi<sup>225</sup>, las cubiertas ajardinadas con riego sí que presentaban un potencial ahorro de refrigeración, mientras que, en el caso de las cubiertas con el agua limitada, es decir, las autosuficientes sin riego, el potencial de ahorro se producía en calefacción, no en refrigeración. Al no funcionar la evapotranspiración en su máximo potencial, la temperatura en la superficie de la cubierta ajardinada en épocas cálidas y de estrés hídrico se mantiene elevada, así como la transmisión de calor al interior. En este caso la cubierta vegetal no funciona como una herramienta de enfriamiento, sino como una herramienta de aislamiento, tal y como indico Del Barrio<sup>226</sup> en su evaluación del potencial de enfriamiento de una cubierta ajardinada en Atenas (Grecia). El amortiguamiento y desfase de la onda térmica se produce especialmente por la inercia aportada por el sustrato, que, además,

217 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

218 Van der Meulen, S.H. 2019.

219 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

220 Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., *et al.* 2001.

221 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

222 Liu, K. 2003.

223 Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.

224 Kumar, R., Kaushik, S.C. 2005.

225 Yazdani, H., Baneshi, M. 2021.

226 Del Barrio, E.P. 1998.



al disponer de poca humedad, reduce su conductividad térmica. A conclusiones similares llegaron Zinzi y Agnoli<sup>227</sup>, tras observar que las cubiertas con suficiente contenido de humedad sí que presentaban un buen comportamiento reduciendo el consumo de refrigeración, pero confiar en las precipitaciones existentes (es decir, cubiertas autosuficientes sin riego) no es suficiente, especialmente en climas con largos periodos sin lluvias y veranos cálidos (como el clima mediterráneo). En cambio, las cubiertas sin riego, al presentar menor humedad en el sustrato y una menor conductividad, conseguían un menor consumo especialmente en calefacción.

En los climas fríos, la masa vegetal mitiga los efectos del frío en el interior de la vivienda, ajustando las temperaturas interiores dentro de un rango de confort<sup>228</sup>. La inercia térmica del sustrato, la falta de humedad debido a escasas lluvias o una posible capa de nieve también impiden que el calor interior de la vivienda se disipe a través de la cubierta hacia el exterior, al igual que se dificulta que el frío del exterior llegue al interior<sup>229</sup>. Investigaciones realizadas por Gallardo *et al.*<sup>230</sup> en Brasil, en el día más frío del invierno, mostraron un desfase de 4 horas entre la mínima temperatura exterior y la mínima temperatura interior, unos 5 °C por encima de la exterior. La amplitud de temperaturas en el exterior fue de 17 °C, mientras que en el interior se mantuvo alrededor en 6,57 °C en el modelo estudiado con cubierta ajardinada, mostrando que los modelos con vegetación (tanto si era en fachadas como en cubiertas) mantenía la temperatura interna del aire casi 2 °C por encima que los modelos sin vegetación en este contexto de clima frío. Jaffal *et al.*<sup>231</sup> comprobaron que el impacto de la cubierta ajardinada en la temperatura del aire interior es más significativo en climas cálidos, observando reducciones de la temperatura media interior de 2,6 °C, 2 °C y 1,4 °C en Atenas, La Rochelle y Estocolmo, respectivamente. También obtuvieron una demanda total de energía por año del 32 % (de la demanda energética en el caso de disponer una cubierta tradicional) en el clima mediterráneo de Atenas, del 6 % en el clima templado de La Rochelle y del 8 % en el clima frío de Estocolmo. Pero no por esta menor influencia de la cubierta ajardinada en la reducción energética en épocas o climas fríos debe menospreciarse su uso. En España, como se ha visto en el apartado 2.5.4, el consumo energético de los hogares, especialmente el de calefacción, es de los más bajos en comparación con el resto de los países de la UE. Aun así, el consumo energético en calefacción supone entre un 40 % y un 45 % del total del consumo energético de las viviendas<sup>232</sup>. Por lo tanto, una mínima aportación de las cubiertas ajardinadas a la reducción del consumo energético de calefacción en invierno y/o en climas fríos puede ser muy relevante, ya que este supone una parte importante del gasto energético de los hogares.

También en relación con las épocas o climas fríos hay que prestar especial atención al diseño de la cubierta ya que existe el peligro de que la superficie exterior se mantenga más fría que la temperatura del aire, debido a que la vegetación evita la incidencia directa sobre el sustrato de la radiación solar, la temperatura del aire es baja y el sustrato está más húmedo, por lo que su conductividad térmica es mayor<sup>233</sup>. En este caso, la capa interior de la cubierta también se encontrará a menor temperatura y se necesitará más energía para calentar el espacio interior<sup>234</sup>. Este comportamiento lo detectaron Coma *et al.*<sup>235</sup> en sus investigaciones en Puigverd de Lleida (España), comparando el consumo energético de calefacción de dos cubiertas ajardinadas extensivas (espesor de sustrato 5 cm y sin aislamiento, con diferentes materiales en la capa drenante) y una cubierta tradicional con acabado de grava (3 cm de aislamiento de poliuretano). Al comparar el consumo energético de calefacción acumulado a lo largo de todo el invierno comprobaron que el mayor consumo se producía en los interiores bajo las cubiertas ajardinadas, un 11,1 % y 6,1 % (capa drenante de puzolana y migas de goma, respectivamente) en comparación con el consumo energético bajo la cubierta tradicional. Además, las temperaturas en la cara interior de la cubierta eran menores en el caso de las cubiertas ajardinadas, acentuándose la diferencia con la cubierta tradicional cuanto más fría era la temperatura ambiente del aire.

227 Zinzi, M., Agnoli, S. 2012.

228 Gallardo, N.P., Rogério, A., Neves, G.F., *et al.* 2018.

229 Jim, C.Y. 2017.

230 Gallardo, N.P., Rogério, A., Neves, G.F., *et al.* 2018.

231 Jaffal, I., Ouldhoukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.

232 Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020b.

233 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014; Britto, C. 2001; Del Barrio, E.P. 1998.

234 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014; Del Barrio, E.P. 1998.

235 Coma, J., Pérez, G., Solé, C., *et al.* 2016.



Esto puede entenderse debido a la falta de una capa de aislamiento en las cubiertas ajardinadas, ya que en épocas frías en las que el sustrato se mantiene más húmedo, la conductividad térmica de este aumenta a la vez que se pueden producir puentes térmicos. Diferentes estudios confirman que el consumo energético puede relacionarse también con las características de la vegetación, produciéndose, con un valor de LAI alto (en torno a 5), un aumento en el consumo de energía de calefacción, mientras que se reduce el consumo de refrigeración<sup>236</sup>. Las investigaciones de Sailor<sup>237</sup> concluyeron que aumentar la capa de vegetación reducía la demanda energética para refrigeración en verano, pero al mismo tiempo también aumentaba la demanda energética por calefacción en invierno, debido a los efectos de la sombra. Si se realiza un buen diseño, la masa térmica y la mejora de la inercia térmica aportada por el sustrato permiten también la absorción de calor producido en el interior (por calefacción, actividades humanas, etc.), irradiándolo posteriormente para calentar el interior y evitar que este se enfríe, funcionando como almacén de calor en los climas fríos<sup>238</sup>, y así compensar posibles problemas de enfriamiento de la superficie vegetal de la cubierta. Cabe destacar que, las personas que viven en climas fríos son más receptivas a la aceptación de calor irradiado por superficies como chimeneas, o, en este caso, la cubierta.

También el LAI de la vegetación o su altura, entre otras propiedades de la vegetación, y las propiedades y profundidad del sustrato influyen en las ganancias térmicas, y su traducción en consumo energético<sup>239</sup>.

De acuerdo con las **propiedades de la vegetación**, una mayor cobertura asegura una mayor protección del sustrato a la radiación solar, una mayor superficie evaporativa y, si la vegetación es perenne, en invierno un incremento del aislamiento térmico y una disminución del enfriamiento de la superficie del sustrato por convección del aire (aunque hay que recordar los posibles inconvenientes de la cubierta ajardinada en climas o épocas frías)<sup>240</sup>. Lin y Lin<sup>241</sup> comprobaron, tras el estudio de cuatro tipos de cubiertas ajardinadas extensivas en Taiwán, que cualquiera de ellas reducía la temperatura bajo la cubierta, alcanzando 12,5 °C bajo la cubierta con sustrato desnudo (sin vegetación) y reduciéndolos hasta los 5,2-6,2 °C bajo las cubiertas con vegetación. En el caso de especies de hoja caduca, como estas pierden las hojas en invierno, se reducen los costes de calefacción al producirse mayor incidencia solar sobre el sustrato, más oscuro, aumentando su temperatura superficial<sup>242</sup>. No solo el índice de cobertura, sino también el espesor de las hojas son factores contributivos al índice de reducción térmica<sup>243</sup>. De acuerdo con Del Barrio<sup>244</sup>, para el diseño de una cubierta ajardinada que reduzca el flujo de calor a través de la cubierta se debería seleccionar una vegetación con gran follaje y distribución horizontal de las hojas.

Kumar y Kaushik<sup>245</sup> estudiaron la relación entre la presencia de hojas (centrándose en la variación del **LAI**) y la reducción de los flujos de calor, a través de la monitorización de una cubierta en Yamuna Nagar (India). La cubierta ajardinada, gracias a la sombra aportada por la vegetación, llegó a reducir, de media, la temperatura interior en 5,1 °C, aportando un potencial de enfriamiento de 3,02 kWh/día. Investigaciones realizadas por Olivieri *et al.*<sup>246</sup> en una cubierta construida en Agugliano (Italia) determinaron que, con vegetación densa, las ganancias térmicas que llegaban al interior de la vivienda se reducían en un 60 % respecto a las ganancias en una cubierta sin vegetación; y durante la noche o en periodos fríos, el flujo de calor hacia el exterior era un 9 % mayor con vegetación densa que sin vegetación. Asimismo, se estudiaron las ganancias térmicas a través de la cubierta ajardinada en función de factores relevantes como el LAI, la altura de la vegetación y la conductividad del suelo seco. Las conclusiones fueron que la diferencia entre la temperatura media de las superficies exterior e interior de la cubierta, al igual que la resistencia térmica del sustrato,

236 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

237 Sailor, D.J. 2008.

238 Jim, C.Y. 2017.

239 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

240 Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L.B., *et al.* 2017; Britto, C. 2001.

241 Lin, Y.-J., Lin, H.-T. 2011.

242 Pandit, R., Laband, D.N. 2010.

243 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

244 Del Barrio, E.P. 1998.

245 Kumar, R., Kaushik, S.C. 2005.

246 Olivieri, F., Di Perna, C., D'Orazio, M., *et al.* 2013.



mantenían una relación inversamente proporcional al LAI. A la misma conclusión llegaron Jaffal *et al.*<sup>247</sup>, cuyas investigaciones muestran que el impacto de la variación del LAI disminuye en niveles altos, por lo que una variación del LAI de 0,5 a 2 produce una reducción de la temperatura interior en 0,3 °C, mientras que una variación del LAI de 1,5 a 3,5 implica solo una disminución en la temperatura de 0,1 °C, y una variación de 3,5 a 5 implica una disminución de la temperatura interior de menos de 0,1 °C. Silva<sup>248</sup> obtuvo resultados similares en Lisboa (Portugal) destacando que un aumento del LAI implicaba menos consumo energético de refrigeración, como se ha comentado, pero producía un comportamiento inverso en periodos fríos, aumentando ligeramente la energía necesaria para calefacción. Aun así, concluyó que el ahorro energético total anual es mayor a elevados valores de LAI (5), ya que el aumento de consumo de calefacción que implica es menor que el ahorro en energía para refrigeración.

Para Wong *et al.*<sup>249</sup> el recubrimiento vegetal óptimo era con arbustos, consiguiendo un ahorro del 15 % respecto a la energía consumida por el mismo edificio, pero con una cubierta tradicional, y siendo estas disminuciones del 79 % respecto a la carga de enfriamiento en el espacio interior. Esto se puede deber a que la mayor altura de esta vegetación permite el paso de aire entre la capa de vegetación y el substrato, mejorando los intercambios de calor por convección y disipando parte del calor acumulado por la incidencia de la radiación solar o el vapor de agua acumulado por la evapotranspiración. Un desplazamiento del vapor de agua cercano a la cubierta permite que se pueda evaporar más cantidad, ya que se produce un diferencial mayor en la presión del vapor de agua entre la superficie de la vegetación y el aire de alrededor, y, por lo tanto, se consigue disipar más calor por evapotranspiración (disminuyendo los flujos de calor, la carga interior y la energía necesaria para enfriar el espacio bajo cubierta). Silva<sup>250</sup> destacó este mismo comportamiento en sus investigaciones, aunque remarcó que en climas fríos es preferible emplear vegetación de poca altura, ya que esta presenta un mayor ahorro en calefacción. Al contrario que se ha mencionado previamente, esta vegetación limitaría la entrada de aire entre vegetación y substrato y la disipación del calor, positiva en invierno para mantener la superficie exterior de la cubierta a mayor temperatura.

El **albedo** de la superficie de la cubierta ajardinada, determinado por el albedo de la vegetación, también se muestra relevante, ya que un elevado albedo evita la acumulación de calor en los materiales y reduce la emisividad térmica desde estos materiales hacia capas inferiores<sup>251</sup>. Las cubiertas reflectantes siguen este principio, mostrándose como una herramienta útil para reducir la energía de enfriamiento cuando se produce una incidencia elevada de radiación solar, ya que mantienen el resto de capas de la cubierta a menor temperatura, pero en momentos con escasa o nula radiación solar (como pueden ser los periodos de invierno o nocturnos) aumentan la demanda de energía de calefacción al reflejar gran parte de la radiación solar y no transmitir energía calorífica a través de las diferentes capas de la cubierta<sup>252</sup>. De acuerdo con Santamouris<sup>253</sup>, durante los picos de radiación solar del verano, cuando la intensidad puede rondar los 900 W/m<sup>2</sup>, las cubiertas ajardinadas, con albedos entrono a 0,2-0,3, absorben 300-550 W/m<sup>2</sup> más que las cubiertas reflectantes, con albedos entre 0,6 y 0,8. Investigaciones de Vox *et al.*<sup>254</sup>, en relación con las propiedades radiométricas de materiales metálicos para el revestimiento de cubierta y su efecto en la temperatura de la cubierta en verano, mostraron que coeficientes de reflectancia del 7,1 % (es decir un albedo de 0,071), para un aluminio marrón, y del 40,1 % para un acero rojo, se traducían en diferencias de temperatura significativas cuando la radiación solar incidente era mayor a 600 W/m<sup>2</sup>. Una diferencia del 0,134 en el albedo (entre un aluminio rojo y uno verde) se traducía en una diferencia de temperatura de hasta 8 °C, concluyendo que coeficientes de reflectancia mayores al 22 % (es decir, albedos mayores a 0,22) y coeficientes de emisividad mayores al 90 % reducían significativamente la temperatura en la superficie durante los periodos calurosos.

247 Jaffal, I., Ouldboukhithine, S.-E., Belarbi, R. 2012.

248 Silva, M.F. da R. 2014.

249 Wong, N.H., Cheong, D.K.W., Yan, H., *et al.* 2003.

250 Silva, M.F. da R. 2014.

251 Van der Meulen, S.H. 2019.

252 Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., *et al.* 2013; Yazdani, H., Baneshi, M. 2021; Zinzi, M., Agnoli, S. 2012.

253 Santamouris, M. 2014.

254 Vox, G., Maneta, A., Schettini, E. 2016.





He *et al.*<sup>255</sup> compararon el comportamiento térmico y energético de una cubierta reflectante en Shanghái (China), con un albedo de 0,7, y una cubierta ajardinada con un albedo de la capa de vegetación de 0,3. Comprobaron que la cubierta ajardinada reducía la demanda energética de refrigeración en un 3,6 % y de calefacción en un 6,2 %, en comparación con una cubierta tradicional, mientras que la cubierta reflectante reducía la demanda energética de refrigeración en un 3,6 % y aumentaba la demanda energética de calefacción en un 10,4 %. Yang *et al.*<sup>256</sup>, en sus investigaciones y simulaciones en Singapur, compararon el comportamiento de una cubierta reflectante (con albedo de 0,9) y una cubierta ajardinada, concluyendo, a lo largo de todo un verano, que la cubierta reflectante era capaz de reducir los flujos de calor hacia el interior en un 37 % y la cubierta ajardinada en un 31 %, y en las horas críticas de radiación solar (de 9:00 a 17:00 h) de un día típico de verano, la cubierta reflectante y la cubierta ajardinada reducían el flujo de calor en un 8 % y un 0,4 %, respectivamente. Cabe destacar que la contradicción de los datos respecto al mejor comportamiento de una cubierta reflectante o ajardinada en función de su albedo puede deberse a las particularidades del clima (predominio del consumo energético para refrigeración en climas más cálidos o de calefacción en climas más fríos), a las condiciones de desarrollo de la vegetación o el nivel de humedad en el sustrato y la capa de vegetación, el cual determinará la evapotranspiración del sistema<sup>257</sup>.

De hecho, en referencia con el desarrollo de la vegetación, los experimentos de Maclvor y Lundholm<sup>258</sup>, con el análisis de un par de módulos de cubierta ajardinada, uno con vegetación, que reflejaba una media del 0,22 de la radiación incidente, mientras que el módulo sin vegetación tan solo reflejaba el 0,17; junto con el estudio de Lundholm *et al.*<sup>259</sup>, donde se analizó el albedo de una cubierta tradicional, obteniendo valores de 0,066; permitieron concluir que la cubierta ajardinada con vegetación es capaz de mejorar el albedo en un 22,2 % y un 200 % respecto a una cubierta con sustrato desnudo y una cubierta tradicional, respectivamente.

En relación con las **propiedades del sustrato** Wong *et al.*<sup>260</sup> propusieron en sus investigaciones que el suelo óptimo debería estar compuesto de arcilla seca, mostrando, para un espesor de 9 cm, un ahorro del 3 % en la energía consumida y del 64 % en la carga de enfriamiento en el espacio bajo cubierta. Del Barrio<sup>261</sup>, confirmando estas conclusiones, sugiere el uso de un suelo ligero que reduzca la conductividad térmica y el peso de la cubierta. En ensayos realizados por Britto<sup>262</sup> confirmaban que la conductividad térmica del sustrato podía ser doblada aumentando el contenido de humedad del 1 % al 7 %. Al contrario, el mayor contenido de humedad consigue aumentar los beneficios debido al enfriamiento por la mayor evaporación en sustratos (empleando parte del calor absorbido) y por el aumento del calor específico y su inercia térmica, mientras que un sustrato seco mejora el comportamiento aislante térmico en épocas frías<sup>263</sup>. Liu y Minor<sup>264</sup> estudiaron dos cubiertas ajardinadas en Toronto (Canadá), con 7,5 y 10 cm de espesor de sustrato ligero, determinando que las ganancias de calor a través de las cubiertas ajardinadas se reducían aproximadamente en un 70-90 % en verano y las pérdidas de calor en invierno se reducían en un 10-30 %, mientras que la cubierta con mayor espesor de sustrato mostró una mayor efectividad térmica (entorno a un 3 % extra) en el verano. En cambio, Sailor<sup>265</sup> recomienda el uso de un suelo más denso, comprobando que así se aumenta el aislamiento, se reduce la demanda de calor y frío en el interior y se produce un mayor ahorro energético. Silva<sup>266</sup> desarrolló una comparativa entre diferentes densidades del sustrato concluyendo que la diferencia en el consumo energético entre un sustrato de mayor o menor densidad no resultaba relevante. Ello nos lleva a pensar que un sustrato ligero en una cubierta extensiva cuyo uso se plantea en rehabilitación, con-

255 He, Y., Yu, H., Ozaki, A., *et al.* 2020.

256 Yang, J., Kumar, D.I.M., Pyrgou, A., *et al.* 2018.

257 Zinzi, M., Agnoli, S. 2012.

258 Maclvor, J.S., Lundholm, J. 2011.

259 Lundholm, J., Maclvor, J.S., MacDougall, Z., *et al.* 2010.

260 Wong, N.H., Cheong, D.K.W., Yan, H., *et al.* 2003.

261 Del Barrio, E.P. 1998.

262 Britto, C. 2001.

263 Britto, C. 2001; Kazemi, M., Courard, L. 2022; Yazdani, H., Baneshi, M. 2021.

264 Liu, K., Minor, J. 2005.

265 Sailor, D.J. 2008.

266 Silva, M.F. da R. 2014.



siderando el factor de peso propio y del aumento de carga de la estructura portante, puede ser una opción a considerar sin influir de manera relevante con ello sobre el consumo energético del espacio bajo cubierta.

### 3.1.2.2.1 Particularidades de comportamiento térmico y energético en rehabilitación

Como ya se ha indicado en párrafos previos, las cubiertas ajardinadas presentan unas características que las hacen muy adecuadas para su uso en el campo de la rehabilitación de edificios, especialmente aquellos cuya envolvente posee unas pésimas propiedades térmicas.

Por ejemplo, en Reino Unido la regulación constructiva actual requiere que el valor máximo de la transmitancia térmica (U) de una cubierta sea de 0,25 W/m<sup>2</sup>K, tanto para edificios residenciales como para el resto de los usos (con algunas excepciones en el caso de ciertas actividades industriales)<sup>267</sup>. En España, de acuerdo con los valores más restrictivos del anejo E del CTE DB-HE, la transmitancia térmica de una cubierta debe estar por debajo de valores entre 0,19-0,50 W/m<sup>2</sup>K, en función de la zona climática (véase apartado 2.5.4.1)<sup>268</sup>. Por lo tanto, los edificios actuales, si se diseñan con una capa de material aislante de espesor adecuado, pueden cumplir con creces estos valores de transmitancia sin necesidad de emplear cubiertas ajardinadas, que en estos casos pueden llegar a ser percibidas por los usuarios como un simple sobrecoste de la construcción. El problema radica en los edificios realizados antes de la introducción de esta normativa y que siguen activos en la actualidad. Por ejemplo, Reino Unido no aplicó ningún requisito de aislamiento hasta 1965, por lo que muchos edificios del parque actual de viviendas tienen muy poco aislamiento, o inexistente<sup>269</sup>. En España, casi 6 millones de edificios del parque de viviendas actual están construidos antes de 1980<sup>270</sup>, por lo que se diseñaron y construyeron sin aislamiento en la envolvente, ya que la primera normativa que introduce estos aspectos es la *Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas* (NBE-CT-79), que entró en vigor en 1979<sup>271</sup> (véase apartado 2.5.4).

Tras un progresivo y rápido envejecimiento de este tipo de edificios, debido a la deficiente calidad constructiva, la falta de determinadas prestaciones básicas y la carencia de un mantenimiento adecuado, se hace necesaria una rehabilitación, destacando como la estrategia más sostenible para renovar el parque de viviendas actual<sup>272</sup>. En este contexto, añadir una cubierta ajardinada durante la rehabilitación de estos edificios mejorará su comportamiento térmico y energético<sup>273</sup>. Pero no todas las cubiertas son susceptibles de reinventarse como cubierta ajardinada: en las cubiertas planas o de pendientes menores al 13 % (7 °) se pueden instalar cubiertas con vegetación, pero solo extensivas, ya que la estructura no es capaz de soportar mayores cargas<sup>274</sup>. Aun así, hablando de rehabilitación, siempre será necesario desarrollar un estudio previo que indique de manera acurada el estado constructivo y estructural del edificio, siendo este la base para la toma de decisiones en cuanto a diseño y actuaciones.

Uno de los estudios más relevantes en cuanto al ahorro energético gracias a la rehabilitación con una cubierta ajardinada fue realizado por Niachou *et al*<sup>275</sup>. Mediante el programa de simulación térmica TRNSYS se modelaron tres cubiertas con niveles diferentes de aislamiento térmico en un edificio de oficinas de Atenas (Grecia): para la versión con mejor aislamiento, colocar una cubierta ajardinada no implicaba un gran ahorro (menores a un 2 %), pero para la opción con menor aislamiento, la cubierta ajardinada podía conseguir un reducción del consumo energético sustancial.

267 Ministry of Housing, Communities & Local Government. 2016a; 2016b.

268 Ministerio de Fomento. 2022a.

269 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., *et al.* 2010.

270 IDAE. 2007.

271 IVE. 2011; Presidencia del Gobierno. 1979.

272 IVE. 2011.

273 Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., *et al.* 2010; Yazdani, H., Baneshi, M. 2021.

274 Van der Meulen, S.H. 2019.

275 Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., *et al.* 2001.



Otros estudios al respecto llegaron a conclusiones similares, como Wong *et al.*<sup>276</sup>, que realizaron una serie de simulaciones en un edificio de cinco plantas en Singapur, demostrando que, para una cubierta con un valor de U de 0,51 W/m<sup>2</sup>K (es decir, con aislamiento y buena resistencia térmica), un recubrimiento con vegetación cespitosa tan solo reducía el consumo anual de energía de enfriamiento en un 0,6 %. Mientras que, en una cubierta sin aislamiento previo, este mismo recubrimiento vegetal podía producir un ahorro de energía para enfriamiento anual del 10,5 %, comparado con la cubierta no aislada y sin vegetación. Las investigaciones llevadas a cabo en una escuela infantil en Atenas (Grecia), con parte de la cubierta ajardinada con un sistema extensivo (U=0,77 W/m<sup>2</sup>K) y otra parte con acabado de lámina bituminosa autoprottegida (U=0,98 W/m<sup>2</sup>K), realizadas por Barmparesos *et al.*<sup>277</sup>, determinaron que en el periodo más caluroso del año (junio-julio) las aulas bajo la cubierta ajardinada mostraban 2,8 °C menos que las aulas bajo la cubierta tradicional. En periodos cálidos, pero menos extremos (abril-junio) la temperatura bajo la cubierta ajardinada era 1,3 °C menor, mientras que en el periodo frío (octubre-marzo) la temperatura bajo la cubierta extensiva era 3,3 °C mayor. Además, comprobaron que, durante el periodo cálido, bajo la cubierta ajardinada se sobrepasaba la temperatura de confort (26 °C) el 80,6 % de las tomas, realizadas cada 15 minutos, mientras que en el espacio bajo la cubierta bituminosa se sobrepasaba en el 86,2 % de las mediciones. Por lo tanto, la mejora de la transmitancia térmica, aunque siendo solo de 0,21 W/m<sup>2</sup>K, al aplicarse sobre una cubierta con escasa resistencia térmica muestra una cierta eficacia de la cubierta ajardinada como sistema de mejora del comportamiento térmico y aislante de la envolvente.

Las investigaciones de Emorfopoulou y Aravantinos<sup>278</sup> reflejaron que la ausencia de una capa de material aislante ensanchaba, en una cubierta tradicional, la diferencia de temperatura en el interior entre el verano y el invierno, pero este diferencial disminuía de manera notable si se trataba de una cubierta sin aislamiento, pero ajardinada. Scharf y Kraus<sup>279</sup> llegaron a conclusiones similares al observar que el flujo de calor en un día tipo de verano, a las 17:00 h, era de 350 W/m<sup>2</sup> en una cubierta tradicional, valor mayor a aquellos obtenidos con cubiertas ajardinadas extensivas (150 W/m<sup>2</sup> y 100 W/m<sup>2</sup>). Esta diferencia se mostraba tan evidente debido a que la cubierta tradicional existente no tenía una capa de material aislante, tan solo 12 cm de forjado de hormigón y una lámina bituminosa impermeable. Santamouris *et al.*<sup>280</sup> detectaron unos hechos similares en unas simulaciones realizadas en una cubierta ajardinada en Atenas (Grecia), donde obtuvieron, con la instalación de una cubierta ajardinada, un ahorro energético en enfriamiento del 15-49 % para el edificio sin aislamiento previo, mientras que si el edificio se encontraba previamente bien aislado estos valores se reducían al 6-33 %. Jaffal *et al.*<sup>281</sup> también analizaron este comportamiento, concluyendo que, en un modelo sin aislar, la cubierta ajardinada reducía la temperatura media y la máxima del aire en el interior en 6,5 y 9,3 °C, respectivamente. En cambio, en una cubierta que previamente tenía 30 cm de capa de material aislante, esta reducción era menor a 1 °C. En cuanto a la demanda energética total (refrigeración y calefacción), se reducía en un 50 % en comparación con cubiertas sin aislamiento térmico, pero al comparar con cubiertas con un espesor de 30 cm de material aislante, la reducción era solo de un 3 %. Berardi<sup>282</sup> también llegó a conclusiones similares en sus estudios en Toronto (Canadá), con reducciones del consumo energético total de hasta 1,8-2,9 % respecto a la cubierta existente anteriormente (con U=0,7 W/m<sup>2</sup>), aumentando estas reducciones debido, en mayor medida, a la profundidad del substrato que al LAI de la vegetación. Yazdani y Baneshi<sup>283</sup> detectaron, en un clima moderado, que la cubierta ajardinada sin riego alcanzó un ahorro mayor (52 %) que la cubierta ajardinada con riego (43 %) respecto a una cubierta tradicional sin aislamiento. Respecto al mismo edificio, pero con una capa de material aislante de 5 cm de espesor, la instalación de la cubierta sin riego siguió consiguiendo un mejor ahorro (26 %) que con riego (24 %). Zinzi y Agnoli<sup>284</sup>, en sus simulaciones ubicadas en Barcelona (España), comprobaron también que se producía un consumo de energía anual ligeramente inferior con una cubierta sin riego (tan solo dependiente de los eventos lluviosos) que

276 Wong, N.H., Cheong, D.K.W., Yan, H., *et al.* 2003.

277 Barmparesos, N., Assimakopoulos, M.N., Assimakopoulos, V.D., *et al.* 2018.

278 Emorfopoulou, E., Aravantinos, D. 1998.

279 Scharf, B., Kraus, F. 2019.

280 Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., *et al.* 2007.

281 Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.

282 Berardi, U. 2016.

283 Yazdani, H., Baneshi, M. 2021.

284 Zinzi, M., Agnoli, S. 2012.



con una cubierta con sistema de riego continuo. Esto lleva a reflexionar sobre la idoneidad de instalar una cubierta ajardinada con o sin riego en los casos de rehabilitación, en función del clima, desde un punto de vista de ahorro energético, coste de construcción y mantenimiento.

La rehabilitación, por lo tanto, nos permiten actuar en los elementos constructivos e introducir medidas pasivas de ahorro energético en edificios que, de otra forma, serían muy poco sostenibles y, de no ser por los trabajos de rehabilitación, quedarían en desuso implicando un desperdicio de materiales y recursos<sup>285</sup>.

A la hora de rehabilitar una cubierta, de acuerdo con el panorama constructivo actual en España, las dos alternativas propuestas por el IVE<sup>286</sup> a la hora de mejorar el comportamiento térmico y energético del edificio son añadir el aislamiento por el exterior o por el interior del inmueble. En el caso de una cubierta ajardinada, la masa térmica se coloca por el exterior del edificio, tanto si el sistema lleva una capa de aislamiento como si simplemente lleva una capa de substrato (no recomendado). Cabe destacar que, en estos casos se instalará a priori una cubierta extensiva, debido a las cargas sobre la estructura, por lo que se recomienda el uso de una capa de aislamiento térmico, debido a que el espesor de substrato no será suficiente para asegurar el confort en el interior, como ya se ha comentado en apartados anteriores. Aun así, se recomienda que en cualquier caso se disponga siempre una capa de material aislante (véase apartado 4.1.9). Las ventajas de la disposición del aislamiento por el exterior son el aprovechamiento de la inercia térmica del soporte resistente, no se reduce la altura libre en el espacio bajo cubierta, se puede reformar la cubierta sin necesidad de desalojar los espacios interiores y, en comparación con la colocación de aislamiento por el interior, no hay riesgo de condensaciones si se dispone una barrera de vapor bajo la capa de aislante térmico o se ejecuta una cubierta invertida. Los posibles inconvenientes de este sistema, por el contrario, son los encuentros con elementos constructivos existentes, como cajas de escalera, claraboyas o petos de fachada, y la posible necesidad de un nuevo planteamiento de pendientes para conseguir un adecuado drenaje. Especial mención deben recibir las cubiertas con cámara de aire sobre forjado, ya que, a la hora de rehabilitarse, la opción más adecuada desde el punto de vista técnico y de eficiencia medioambiental es incluir el material aislante en la cámara de aire sobre el forjado, siempre y cuando no se pueda retirar esta y ejecutar la cubierta ajardinada directamente sobre el forjado horizontal de cubierta o estructura resistente.

### 3.1.2.3 Reducción de las temperaturas superficiales

En apartados anteriores se ha mencionado, brevemente, la influencia de las variaciones de temperatura en la superficie de la cubierta ajardinada, pero en este caso se profundizará más en sus particularidades respecto a una cubierta tradicional. La existencia de vegetación como revestimiento de la cubierta minimiza los incrementos en la temperatura de la superficie del substrato durante el día debido a diferentes factores<sup>287</sup>:

- Impide la incidencia directa de la radiación solar gracias a sus hojas, que aportan sombra al substrato y minimizan el calentamiento (efecto sombra).
- Disminuye la oscilación térmica gracias a la reflexión y el uso de la energía absorbida por las plantas en la fotosíntesis y la evapotranspiración.
- Reduce la fuerza del viento en proporción a la densidad del follaje y la altura de la planta, disminuyendo la propagación convectiva de la onda de calor.

Respecto al segundo punto, hay que destacar que no se debe olvidar que el comportamiento térmico de la vegetación no solo está influenciado por sus propiedades de reflexión y absorción (debido a un color más claro), sino que también se ve afectado por las características morfológicas<sup>288</sup>. Britto<sup>289</sup> realizó un experimento exponiendo a radiación solar en hora punta del mes de mayo tres módulos de poliestireno extruido, uno negro, otro verde y otro con vegetación. La temperatura alcanzada de media por el módulo con vegetación era casi 2 °C por debajo que la temperatura media en el módulo verde, a pesar de tener el mismo color.

285 IVE. 2011.

286 *Ibidem*.

287 Britto, C. 2001.

288 *Ibidem*.

289 *Ibidem*.



Por lo tanto, la principal absorción de radiación se produce en la parte superior de la capa de vegetación, por lo que la temperatura en este punto es mayor a la temperatura en la superficie del sustrato (siempre y cuando la sombra y cubrición del sustrato sean adecuadas) durante el día y menor por la noche<sup>290</sup>. De acuerdo con investigaciones de Jaffal *et al.*<sup>291</sup> la temperatura del follaje era 13,2 °C más elevada que la temperatura del sustrato en el día más caluroso de la época cálida, a la vez que se comprobó que en ausencia de radiación solar (durante la noche) la temperatura del follaje era menor que la temperatura del aire. Fioretti *et al.*<sup>292</sup> en sus investigaciones en una cubierta ajardinada en Ancona (Italia), determinaron que el pico de radiación solar incidente bajo la vegetación se reducía, en días significativos de estudio, entre el 51,03 % y el 89,27 %, respecto a la radiación solar incidente en la superficie de una cubierta tradicional. La reducción de la radiación solar incidente a lo largo del día se situaba entre valores del 81,22 %-90,52 %.

Aunque no se consiga una cubrición total por parte de la vegetación, Britto<sup>293</sup> comprobó que la vegetación era capaz de influir en la temperatura superficial del sustrato desnudo pero próximo a la zona sombreada. Entre agrupaciones de plantas había 20 cm, y la mayor temperatura en esta franja que separaba dos zonas cubiertas por vegetación se situaba en el medio, entre 1 y 4 °C por encima de la temperatura de la zona sin sombra, pero más cercana a la vegetación. De ahí se puede concluir que la cobertura vegetal ayuda a mantener la uniformidad de la temperatura en la superficie, reduciendo o eliminando los puentes térmicos, en mayor medida a mayor cobertura de la superficie<sup>294</sup>. Fioretti *et al.*<sup>295</sup> detectaron que para una cubierta tradicional en el clima mediterráneo de Marche (Italia), la superficie llegaba hasta los 60 °C, con grandes fluctuaciones diarias de temperatura, mientras que en la cubierta ajardinada las temperaturas eran más estables a lo largo del día, manteniendo las máximas por debajo de los 30 °C. Las investigaciones de Wong *et al.*<sup>296</sup> también confirman estas conclusiones al tomar muestras en cubiertas construidas y comprobar que el calor acumulado en una cubierta ajardinada sin vegetación, desnuda, se libera al interior del edificio durante la noche (hecho no deseable en climas y épocas cálidas), mientras que en los casos con vegetación la acumulación de calor en el sustrato era menor durante el día, y este efecto era menos relevante. Debido a la vegetación la máxima temperatura en la superficie del sustrato se quedó en torno a 30 °C, disminuyendo respecto a la cubierta sin vegetación, a la vez que se comprobó que esta temperatura variaba en función del LAI. A mayores valores de LAI se reducía la temperatura media de la cara superior del sustrato, reduciendo el flujo de calor que penetraba en la estructura de la cubierta en valores cercanos a 4 W/m<sup>2</sup><sup>297</sup>. También el color de la vegetación y la estructura de la planta y la hoja influyen en las temperaturas alcanzadas en la superficie del sustrato, siendo menores en el caso de vegetación oscura y con hojas de mayor sección<sup>298</sup>.

También Olivieri *et al.*<sup>299</sup> compararon la temperatura superficial de la cubierta ajardinada, con y sin vegetación, con la temperatura del aire, llegando a conclusiones similares. En los casos sin vegetación la temperatura de la superficie del sustrato era entre 6-7 °C más elevada que la del aire, ocurriendo lo mismo en la cara superior del aislamiento térmico bajo el sustrato (entre 4-6 °C por encima de la temperatura del aire). En cambio, en el caso de cubiertas ajardinadas con vegetación, especialmente si esta era densa (con altos valores de LAI), la temperatura de la superficie del sustrato era similar o igual a la del aire, y la cara superior del aislamiento térmico presentaba valores medios entre 3-4 °C por debajo de la temperatura del aire. Datos similares obtuvieron Jaffal *et al.*<sup>300</sup> con una reducción de hasta 12,8 °C en la superficie del sustrato en relación con la temperatura del aire exterior, en el día más caluroso de la estación cálida.

290 Britto, C. 2001; Oke, T.R. 2002.

291 Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.

292 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

293 Britto, C. 2001.

294 Cruz, A.I. 2017.

295 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

296 Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., *et al.* 2003.

297 Kumar, R., Kaushik, S.C. 2005.

298 Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., *et al.* 2001.

299 Olivieri, F., Di Perna, C., D'Orazio, M., *et al.* 2013.

300 Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.



Niachou *et al.*<sup>301</sup> emplearon termografías infrarrojas (IRT) para estudiar la temperatura superficial de una cubierta ajardinada cerca de Atenas (Grecia). En las imágenes se podía apreciar que la superficie del sustrato alcanzaba temperaturas máximas entre 26 y 40 °C, dependiendo del tipo de vegetación. La menor temperatura superficial (entre 26-29 °C) se obtuvo en los lugares dominados por la vegetación oscura y gruesa, mientras que las mayores temperaturas (entre 36-38 °C) se tomaron en lugares cubiertos con escasa vegetación, llegando a alcanzar los 40 °C en lugares donde el sustrato estaba desnudo. En el caso de una cubierta tradicional no ajardinada, las temperaturas superficiales variaban entre 42 y 48 °C, por lo que la reducción de la temperatura superficial por parte de una cubierta ajardinada era de aproximadamente 10 °C. Todos estos datos reflejan la importancia del estado de la vegetación, su desarrollo y cobertura, en las temperaturas alcanzadas en la superficie exterior del sustrato y en los flujos de calor que se van a producir a través del elemento de cubierta.

En cambio, en invierno, aunque la vegetación pueda influenciar negativamente en la temperatura superficial, debido al efecto sombra y la captación de radiación solar, el follaje también puede jugar un papel de aislamiento y limitar la transferencia de calor entre la cubierta y el exterior<sup>302</sup>. Jaffal *et al.*<sup>303</sup> estudiaron la temperatura del sustrato en la estación fría, obteniendo una temperatura de este 5,6 °C por encima de la temperatura del aire. Este efecto de aislamiento puede explicar que en invierno la temperatura del follaje fuera 4,9 °C menor que la temperatura superficial del sustrato, al contrario que en verano.

Además de la reducción de la temperatura en la superficie del sustrato, se produce también una reducción en la temperatura superficial del resto de capas de la cubierta, especialmente por debajo de la capa de aislamiento térmico. Destaca especialmente la reducción de temperatura y las fluctuaciones en la superficie de la lámina impermeable, aumentando así su durabilidad al someterla a menor estrés térmico<sup>304</sup>. Liu<sup>305</sup> demostró que en una cubierta extensiva (espesor de sustrato de 15 cm) la temperatura en la lámina impermeable de la cubierta ajardinada, bajo el sustrato, era de 30 °C, en comparación de los 70 °C que se llegaba a alcanzar en la cubierta tradicional de referencia, mientras que las fluctuaciones diarias de temperatura eran de 5-7 °C en la cubierta ajardinada en comparación con variaciones de 42-47°C en la cubierta de referencia. Jaffal *et al.*<sup>306</sup> midieron temperaturas mínimas y máximas en la superficie de la estructura de la cubierta, alcanzando los -6 °C en invierno y los 58 °C en verano en una cubierta tradicional, mientras que en una cubierta ajardinada los valores se reducían a -4 °C en invierno y a 20 °C en verano. Fioretti *et al.*<sup>307</sup> concluyeron, igualmente, que la superficie de la estructura de hormigón, bajo todas las capas de la cubierta ajardinada, alcanzaba menores temperaturas que en el caso de una cubierta tradicional, debido a la sombra de la vegetación, el aislamiento y la evapotranspiración.

He *et al.*<sup>308</sup> compararon también las temperaturas superficiales de la cubierta ajardinada y la cubierta reflectante. Con la cubierta reflectante (albedo de 0,7) se consiguieron reducciones medias de 3,3 °C en la temperatura superficial respecto a una cubierta tradicional (no reflectante y no ajardinada) con un albedo de 0,2. En cambio, las cubiertas ajardinadas estudiadas (albedo de 0,3), con diferentes espesores de sustrato y tipos de vegetación, consiguieron una reducción media de 2,9 °C en la temperatura superficial. Al igual que en el caso anterior, deberían conocerse el crecimiento de la vegetación y la humedad del sistema para considerar la influencia de la evapotranspiración en los intercambios de calor producidos. Respecto al invierno, se comprobó que las cubiertas ajardinadas tenían un mejor comportamiento aislante que las cubiertas reflectantes, con una temperatura superficial 3,3 °C mayor en la superficie de las cubiertas ajardinadas respecto a la cubierta reflectante, y un flujo de calor 1,9 W/m<sup>2</sup> mayor.

301 Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., *et al.* 2001.

302 Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R. 2012.

303 *Ibidem.*

304 Liu, K. 2003.

305 *Ibidem.*

306 Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R. 2012.

307 Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., *et al.* 2010.

308 He, Y., Yu, H., Ozaki, A., *et al.* 2020.



### 3.1.2.4 Reducción del consumo energético asociado a los materiales

La reducción del consumo energético en los edificios no solo se puede alcanzar mediante el menor uso o la menor carga en los equipos de refrigeración o calefacción. Conforme mejora el estándar de vida de las personas va aumentando progresivamente el consumo energético de los edificios, por lo que en el proyecto de arquitectura sostenible debe plantearse una reducción del consumo desde periodos tempranos del proyecto, ya que en la fase de construcción se consume una gran cantidad de energía en relación con la ejecución y el transporte de los materiales de construcción<sup>309</sup>. También la construcción modular y la reducción de residuos producidos en la construcción pueden ayudar a minimizar el consumo energético del edificio<sup>310</sup>.

El consumo energético asociado a la extracción, el procesado, la preparación y el transporte de los materiales se conoce como energía incorporada<sup>311</sup> (o *Embodied Energy* en inglés) (Figura 3.3). La valoración de la energía incorporada debe tener en cuenta la energía implicada en el proceso de creación del material, incluido el transporte; la cantidad de ese material que se emplea en la construcción; y, en algunos métodos de cálculo, también se incluye en el cálculo la energía necesaria para eliminar o reutilizar ese material<sup>312</sup>.

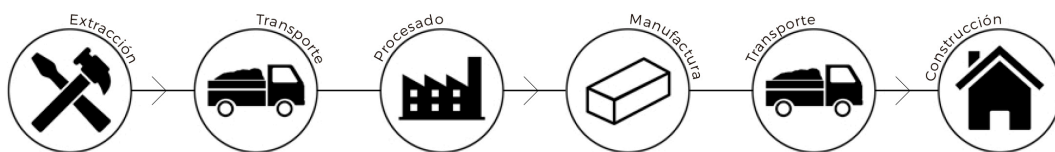


Figura 3.3. Energía incorporada de los materiales de construcción.

La reutilización de materiales de construcción, siempre que sea posible, reduce considerablemente la energía incorporada relacionada con la extracción y el procesado de nuevos materiales, al igual que disminuye el agotamiento de las fuentes de materias primas<sup>313</sup>. En el caso de los materiales reciclados hay que tener en cuenta que, a pesar de que sean más sostenibles por esto mismo, pueden contener una considerable energía incorporada debido al proceso de transformación del material reciclado para su nuevo uso. Hay que destacar que el uso de materiales naturales, como la madera, no siempre implica menor energía incorporada, ya que puede extraerse y procesarse de formas muy destructivas para el medio ambiente<sup>314</sup>.

La energía incorporada representa, normalmente, una proporción menor en relación con la energía consumida durante la vida útil del edificio, pero conforme el proyecto sostenible se orienta a menores consumos de energía en los edificios durante su vida útil, esta fracción aumenta y es más difícil que pase desapercibida. En edificios con un consumo de energía neta nula, la única forma de energía que se consume es la incorporada a sus materiales de construcción<sup>315</sup>.

Una posible solución es el empleo de materiales locales, reduciendo la energía empleada en el transporte de materiales, o la reducción del impacto de la energía incorporada con una compensación en térmicos de emisiones de carbono, introduciendo el término *Embodied Carbon*<sup>316</sup>. El índice de *Embodied Carbon* tiene en cuenta, al igual que en la energía incorporada, las emisiones de CO<sub>2</sub> implicadas en el proceso de creación del material, en el transporte, en la cantidad de material a emplear en la construcción y en el proceso de eliminación o reutilización de este material<sup>317</sup>.

En el caso de las cubiertas ajardinadas, la mayoría de las capas están realizadas con polímeros, cuyo proceso de configuración genera una elevada contaminación<sup>318</sup>. Diferentes estudios demuestran que la contaminación del aire debido a los procesos de producción de los polímeros se compensa con el com-

309 Shao, B., Du, X., Ren, Q. 2018.

310 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

311 *Ibidem*.

312 Hammond, G.P., Jones, C.I. 2008.

313 Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

314 *Ibidem*.

315 *Ibidem*.

316 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017.

317 Hammond, G.P., Jones, C.I. 2008.

318 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.



portamiento ecológico de la cubierta ajardinada en unos 13 años, pero aun así se debe intentar reducir el impacto negativo medioambiental, especialmente de la producción del polietileno y el polipropileno de baja densidad<sup>319</sup>. En concreto, el mejor comportamiento energético y las principales ventajas ambientales se encuentra en las cubiertas intensivas, pero estas son a la vez las que más sustancias tóxicas producen debido a los polímeros que se emplean en sus capas, siendo más sostenibles, desde el punto de vista de la energía incorporada y los índices de contaminación, la cubierta extensiva<sup>320</sup>. Pero sea cual sea el sistema de cubierta ajardinada, es evidente la necesidad de sustituir estos materiales por otros más sostenibles, con menor carga contaminante y energía incorporada<sup>321</sup>.

Se han realizado varias investigaciones orientadas hacia el uso de materiales más sostenibles, como por ejemplo aquellas llevadas a cabo por Pérez *et al.*<sup>322</sup> en la *Universitat de Lleida* (España), con el estudio de las migas de goma de neumáticos empleadas como capa drenante en las cubiertas ajardinadas. Concluyeron que se puede ahorrar mucha energía, ya que otros elementos como la arcilla expandida o la piedra pómez requieren grandes cantidades de energía para los procesos de transformación de la materia prima, aparte de que las migas de goma le aportan un nuevo uso a las ruedas de vehículo que ya no sirven para la circulación. En cuanto a su comportamiento drenante, se comprobó que, aunque depende del tamaño de las migas, no presentan diferencias significativas en cuanto a conductividad hidráulica respecto a la puzolana, al igual que tampoco afecta a la capacidad de retención de agua del conjunto de la cubierta ni al desarrollo de la vegetación. En cambio, las migas de goma aportan un incremento de la resistencia térmica al conjunto, en comparación con la puzolana, pudiéndose explicar esto debido a la menor densidad aparente de las migas de goma<sup>323</sup>.

Investigaciones como las de Fabbri *et al.*<sup>324</sup> demuestran que también se puede mejorar el comportamiento ecológico y la huella energética y de carbono mediante el uso de nuevos sistemas aislantes más sostenibles. Un ejemplo de ello es el aislamiento con fibras de coco, que, aplicado en modelos de cubiertas ajardinadas, mostró un comportamiento térmico muy similar a un aislamiento con poliestireno expandido. El problema de este producto, al igual que ocurre con muchos materiales sostenibles en desarrollo actual, es la escasa implementación en el mercado actual. Su producción se realiza principalmente en países asiáticos y de forma artesanal. La escasa industrialización del sistema aumenta notablemente el coste de este material, además de implicar una energía incorporada mucho mayor debido al necesario transporte. Sería necesaria, por lo tanto, una profundización y desarrollo de los materiales aislantes, especialmente cuando pueden llegar a alcanzar propiedades térmicas iguales o mejores que las de los materiales tradicionales, fomentando así su uso y su menor impacto ambiental indirecto.

Respecto al sustrato, se recomienda el uso de materiales desperdiciados en la construcción como componente inorgánico del sustrato (como, por ejemplo, ladrillos rotos), reduciendo el coste de instalación en la cubierta a la par que la energía incorporada<sup>325</sup>. En relación con el sistema de construcción y la implantación de la vegetación, el desarrollo de técnicas como los sistemas completos, el sistema modular o las mantas precultivadas también favorece a la reducción del consumo de energía asociado a los materiales, ya que se trata de sistemas modulares y conjuntos, no capa a capa, con una reducción del transporte de materiales y de generación de desperdicios en el proceso de construcción debido a sobras o falta de material<sup>326</sup>.

### 3.1.2.5 Resistencia a la propagación del fuego

En general, las cubiertas ajardinadas se considera que presentan un buen comportamiento frente a la propagación del fuego, debido a la cantidad de agua que contienen en la propia vegetación y en el sustrato

319 Bianchini, F., Hewage, K. 2012.

320 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

321 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

322 Pérez, G., Vila, A., Rincón, L., *et al.* 2012.

323 Kazemi, M., Courard, L. 2022.

324 Fabbri, K., Tronchin, L., Barbieri, F. 2021.

325 Cascone, S. 2019.

326 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.





to<sup>327</sup>. El sustrato en sí mismo también presenta una buena resistencia al fuego, aunque este afecte, directamente, a la parte orgánica e, indirectamente, a la estructura del suelo. En función de la intensidad del fuego, el mayor problema que representa para el sustrato es, a largo plazo, una modificación de su estructura interna y una mayor vulnerabilidad a la erosión<sup>328</sup>. La destrucción de raíces, de microorganismos que viven en el suelo y de parte, o la totalidad, de la parte orgánica del sustrato afecta a la estabilidad de los agregados del suelo, haciendo que este sea más susceptible a la erosión por el agua de lluvia o el viento, la pérdida de nutrientes, la disminución de la porosidad interna y el aumento de la escorrentía<sup>329</sup>.

De acuerdo con la norma alemana DIN 4102, las cubiertas ajardinadas se clasifican como “cubiertas resistentes a chispas volantes y calor radiantes”, siempre y cuando sean cubiertas intensivas o se cumplen las siguientes condiciones para el caso de las cubiertas extensivas<sup>330</sup>:

- Sustrato con un máximo del 20 % de su peso de contenido orgánico y espesor mayor a 3 cm.
- Los muros o fachadas que sobresalen en la cubierta deben ascender hasta 30 cm por encima de la cota superior del sustrato.
- En torno a cualquier abertura en la cubierta, como los lucernarios, o alrededor de muros ciegos de menos de 80 cm de altura sobre la cota del sustrato, se dispondrán franjas de 50 cm de ancho sin vegetación, con baldosas o grava (acabado pesado).
- En el caso de medianeras también se debe dejar una franja sin ajardinar con material no combustible.

Para más especificaciones constructivas respecto a la protección frente a la propagación del fuego, consultar el apartado 4.2.9.

### **3.1.3 Particularidades de comportamiento en el clima mediterráneo**

Tras realizar una revisión de la bibliografía relacionada, gran cantidad de estudios concluyen que el mayor impacto ambiental y energético de las cubiertas ajardinadas se produce en los climas cálidos y secos (como el clima mediterráneo Csa), contribuyendo sustancialmente al ahorro energético de los edificios especialmente durante los periodos más cálidos del año, mientras que la influencia en los meses fríos no es tan destacable<sup>331</sup>. Bevilacqua *et al.*<sup>332</sup> en sus investigaciones en una cubierta ajardinada en Cosenza (Italia), considerada clima Csa, determinaron que el periodo con demanda de frío se constituía de los meses desde abril hasta octubre, mientras que el periodo con demanda de calor era desde noviembre a marzo. Consideraban que esta tendencia de siete meses de carga energética de refrigeración y cinco meses de carga de calefacción podría justificar el mayor potencial de ahorro energético de las cubiertas ajardinadas en los meses cálidos, es decir, reduciendo las cargas energéticas de refrigeración.

#### **3.1.3.1 El clima mediterráneo**

Para definir el tipo de clima mediterráneo se va a emplear la clasificación de Köppen, ya que es de uso generalizado debido a su sencillez. Consiste en la caracterización de cada tipo de clima de acuerdo con 3 letras que indican el comportamiento de las temperaturas y las precipitaciones. La primera de las letras indica a cuál de los cinco grupos principales pertenece: tropical, seco, templado, continental o polar. De acuerdo con esta clasificación, los límites entre unos climas y otros se definen teniendo en cuenta la distribución de vegetación, ya que se considera que esta tiene una clara relación con el clima<sup>333</sup>.

Por lo tanto, de acuerdo con la clasificación de Köppen, los climas mediterráneos de veranos secos y cálidos, como es el caso de la costa mediterránea española (véase figura 3.4 para el caso concreto de València),

327 DANOSA España. 2014.

328 Arcenegui, V. 2011.

329 *Ibidem*.

330 FLL. 2018.

331 Cascone, S. 2019; Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

332 Bevilacqua, P., Bruno, R., Arcuri, N. 2020.

333 Meteo Navarra. 2022.



destacan por tener una temperatura media en el mes más cálido por encima de 22 °C, y se denominan como *Csa*<sup>334</sup>. En cambio, los climas mediterráneos de veranos secos y fríos, llamados *Csb*, muestran una temperatura media en el mes más cálido por debajo de 22 °C<sup>335</sup>. En ambos casos la primera letra (C) indica que estos climas se encuentran dentro del grupo del clima templado, mientras que la segunda indica el régimen de lluvias (s= verano seco) y la tercera el comportamiento de las temperaturas en verano (a= subtropical, con temperaturas superiores a los 22 °C / b= templado, con temperaturas inferiores a los 22 °C)<sup>336</sup>.



Figura 3.4. Temperatura promedio por meses en València (España), datos en las décadas de 1950, 1980 y 2010.

Los climas *Csa* destacan, por lo tanto, por altas temperaturas diurnas en los meses cálidos, debido a la intensa radiación solar<sup>337</sup>. En el caso de València, por ejemplo, al ubicarse cerca del mar este funciona como regulador térmico permitiendo que, a pesar de las altas temperaturas diurnas, no se produzca una elevada variación de temperatura diaria. En cuanto a los vientos, son de relativa importancia en invierno, mientras que las principales precipitaciones se producen principalmente durante primavera y otoño, siendo muy frecuentes las lluvias de gran intensidad o torrenciales<sup>338</sup>. Un estudio de las inundaciones producidas en València (España) debido al desbordamiento del río Turia, previo al Plan Sur en el que se redirigió el río por un nuevo cauce fuera de la ciudad, muestra la relevancia de las lluvias torrenciales, que llegaron a implicar un aumento del caudal máximo instantáneo del río en un 1500 % en una riada que se considera extraordinaria (año 1948), y hasta un 2500 % en la riada catastrófica del año 1957<sup>339</sup> (Figura 3.5).

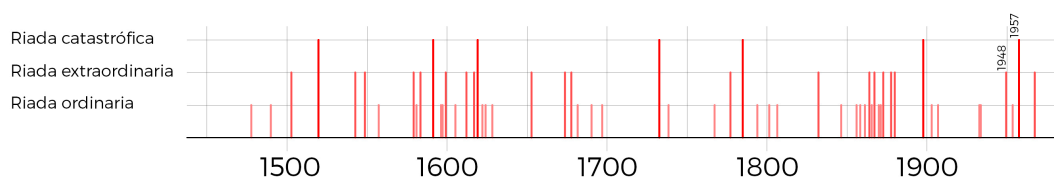


Figura 3.5. Histórico de riadas documentadas en València (España).

Por lo tanto, las principales características que se deberían tener en cuenta a la hora de proyectar una cubierta ajardinada en un clima mediterráneo *Csa* son las altas temperaturas durante el verano, la elevada radiación solar y las largas temporadas de sequía, siendo necesario encontrar vegetación con tolerancia al estrés hídrico, especies locales adaptadas al clima y/o sustrato con un alto valor de WHC, entre otras carac-

334 Cascone, S. 2019.

335 Ibídem.

336 Meteo Navarra. 2022.

337 Cascone, S. 2019; García, P.V. 2016.

338 Ibídem.

339 Lerma, C. 2012.



terísticas<sup>340</sup>. Hay que considerar que no solo los veranos son determinantes a la hora de escoger un sistema de cubierta ajardinada, un tipo de sustrato o una vegetación para el clima *Csa*, ya que los ecosistemas mediterráneos están caracterizados por un doble estrés<sup>341</sup>. Por un lado, como ya hemos comentado, en verano la escasez de precipitaciones genera escaso contenido de humedad en el sustrato, a parte de un déficit de presión de vapor de agua en la atmósfera, pero por otro lado hay que tener en cuenta los inviernos excepcionalmente fríos, que se producen, aproximadamente, cada 10-12 años, y que inhiben el crecimiento de la vegetación produciendo un efecto negativo en el desarrollo de la cubierta ajardinada<sup>342</sup>. En la figura 3.6, para el caso en concreto de València (España), se observan picos en las temperaturas mínimas absolutas que aparecen de manera repetitiva, aunque de manera menos pronunciada con el paso de los años, debido a un aumento de la temperatura global del planeta (véase apartado 2.1). Estos inviernos excepcionalmente fríos producen heladas que pueden dañar la vegetación de las cubiertas ajardinadas, especialmente en el caso de que se trate de un monocultivo<sup>343</sup>. En el caso de que se dispongan varias especies vegetales, unas serán más resistentes que otras, produciéndose una selección natural de las especies, pero sin eliminar la totalidad de la vegetación de la cubierta<sup>344</sup>.

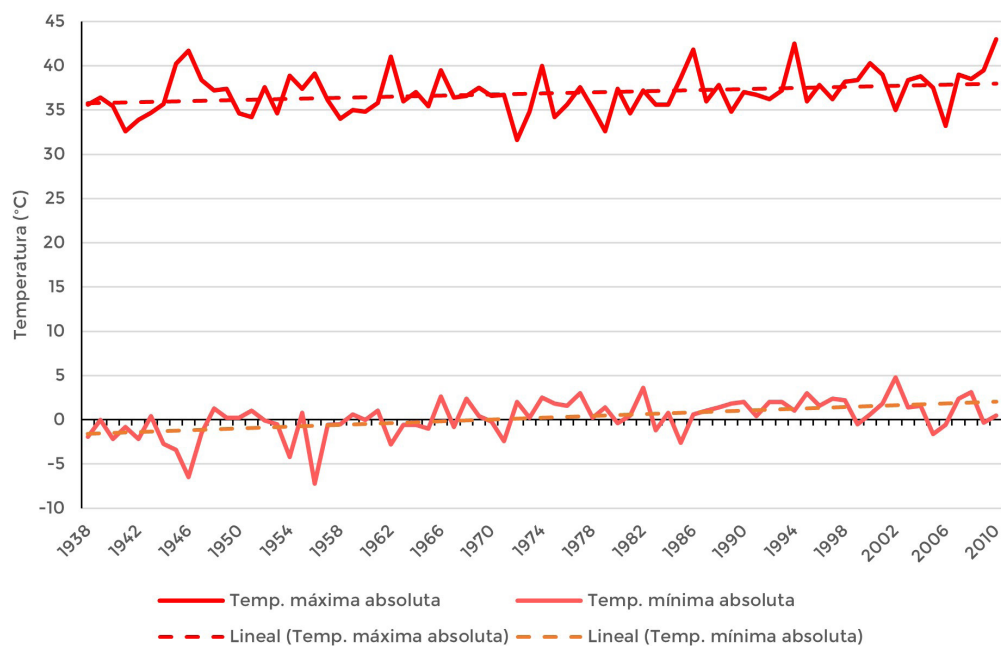


Figura 3.6. Temperaturas máximas y mínimas absolutas en València (España), datos entre 1938-2010.

### 3.1.3.2 Características ambientales en el clima mediterráneo

Diferentes investigaciones han analizado el comportamiento microclimático, energético y térmico de las cubiertas ajardinadas en el clima mediterráneo, como por ejemplo Vestrella<sup>345</sup>, que estudió la temperatura alcanzada por el sustrato en un día típico de la época cálida (17 de agosto de 2009) con una oscilación diaria de la temperatura del aire de 18,7 °C, mientras que en las parcelas ajardinadas la variación fue entre 8,6 y 11,7 °C, en función de la mayor o menor intensidad de riego, determinándose de promedio una temperatura superficial 2,8 °C mayor en las parcelas sin riego respecto a las parcelas con diferentes intensidades de riego. En un día representativo de la época fría (17 de diciembre 2009) las temperaturas en los tratamientos con riego variaron entre mínimas de 2,5 °C y máximas de 10 °C, mientras que en el tratamiento sin riego las temperaturas mínimas fueron mayores, 4,2 °C, y las máximas también, pero en valores casi despreciables,

340 Cascone, S. 2019.

341 Terradas, J., Savé, R. 1992.

342 Ibídem.

343 Campo, C.G. 2004.

344 Ibídem.

345 Vestrella, A. 2016.



10,8 °C. Ese día la temperatura mínima y máxima del aire fue de 1,7 y 13 °C, respectivamente. En invierno, además del riego, Vestrella<sup>346</sup> concluyó que el menor aislamiento a temperaturas frías se daba con especies vegetales más compactas y con menor cobertura.

Las investigaciones de Valera García<sup>347</sup> en Murcia (España), mostraron, a través de termografías IR, que la cubierta ajardinada presentaba una temperatura superficial un 14 % menor (7 °C) que la superficie de cubierta tradicional no ajardinada. Mientras que, si se comparaban las temperaturas bajo el sustrato, la diferencia con la cubierta tradicional era del 20 % (10 °C).

Bevilacqua *et al.*<sup>348</sup>, en sus investigaciones, concluyeron que la energía necesaria para enfriar el espacio bajo una cubierta ajardinada, en comparación con una cubierta tradicional, se reducía en hasta 4 kW, mientras que la energía requerida para calefacción se reducía en aproximadamente 2 kW. Apreciaron también que, en la cubierta tradicional de referencia, el 10 % de las horas que estaba en funcionamiento el sistema de climatización era para aportar más de 4 kW, mientras que, en la cubierta ajardinada, en función de si llevaba o no aislamiento, este porcentaje bajaba al 2 % y al 4 %, respectivamente. Así mismo, tras observar que el mayor ahorro energético se producía en la época de verano, con valores de hasta el 43,8 % respecto a la cubierta tradicional (en 2017, año más cálido que el 2016, cuando el ahorro fue solo de un 39 %), concluyeron que los picos de demanda energética con una cubierta ajardinada tendían a disminuir con climas más cálidos. También destacaron que la cubierta ajardinada sin aislamiento se mostraba como la mejor opción en verano en el contexto climático en cuestión (reducciones en la demanda energética de hasta el 35,2 % en el periodo de junio a septiembre), debido a que la falta de aislamiento permitía que se produjeran mayor cantidad de flujos de calor negativos (del interior hacia el exterior) debido al poder de enfriamiento pasivo para disipar el calor en horas nocturnas con nula radiación solar y temperaturas ambientales más bajas. Mientras, en invierno funcionaba mejor la cubierta con aislamiento (reducciones en la demanda energética de hasta el 52,4 % en el periodo de noviembre a febrero), debido a que se limitaban las pérdidas de calor desde el interior calefactado. Debido a que, como se ha comentado, en los climas mediterráneos, las épocas cálidas son más largas y con temperaturas más extremas, la cubierta ajardinada sin aislamiento se presentó para Bevilacqua *et al.*<sup>349</sup> como la mejor opción en cuanto a ahorro energético global de todo un año, con una reducción de la demanda energética total del 34,7 % respecto a la cubierta tradicional.

---

346 Vestrella, A. 2016.

347 García, P.V. 2016.

348 Bevilacqua, P., Bruno, R., Arcuri, N. 2020.

349 *Ibidem*.



### 3.2 CARACTERÍSTICAS SOCIALES

Siguiendo los tres pilares principales de la sostenibilidad, cabe mencionar también las principales propiedades de las cubiertas ajardinadas desde el punto de vista social. Los beneficios sociales tienen una gran relevancia ya que las acciones de los seres humanos son capaces de afectar económica, cultural, ambiental y psicológicamente a cualquier aspecto del ecosistema de las ciudades<sup>350</sup>. Por lo tanto, además de los beneficios en la salud de las personas, debido a una mejora en la calidad del aire, una mejora del confort tanto en las calles como en el interior de los edificios y la reducción de pérdidas materiales y humanas debido a efectos meteorológicos extremos, entre otros, las cubiertas ajardinadas son capaces de mejorar el sentimiento de colectividad de los habitantes de la ciudad, a la vez que favorecen su desarrollo como sociedad y su evolución hacia un comportamiento y una vida más sostenibles<sup>351</sup>.

Por un lado, se debe destacar, en una fase de desarrollo de las cubiertas ajardinadas, su identidad participativa, que se puede observar en iniciativas como la *Guía de terrats vius i coberts verdes del Ajuntament de Barcelona* (España), a través de la cual se pretende conseguir una transformación social al mismo tiempo que se alcanza un nuevo uso y una renaturalización de espacios abandonados en altura de la ciudad<sup>352</sup>. El diseño conjunto de estos espacios, como lugar de reunión en los edificios comunitarios, potencia el sentimiento de implicación y responsabilidad en el desarrollo del proyecto, el mantenimiento de la cubierta y la mejora de la ciudad, fomentando la percepción de pertenencia a ella<sup>353</sup>. Por otro lado, estos espacios de mejora de la calidad social y colectiva de la ciudad también pueden apoyar y enriquecer la educación urbana y natural, destacando el papel de la cubierta ajardinada como espacio capaz de aportar un valor educativo y experiencial, a parte del valor ambiental o económico<sup>354</sup>. Un ejemplo de la cubierta ajardinada como herramienta de educación es el *East Campus of the Ogden International School*, situado en Chicago (Estados Unidos), donde la cubierta del edificio funciona como parte del colegio y como centro cultural de todo un vecindario<sup>355</sup> (Figura 3.7).

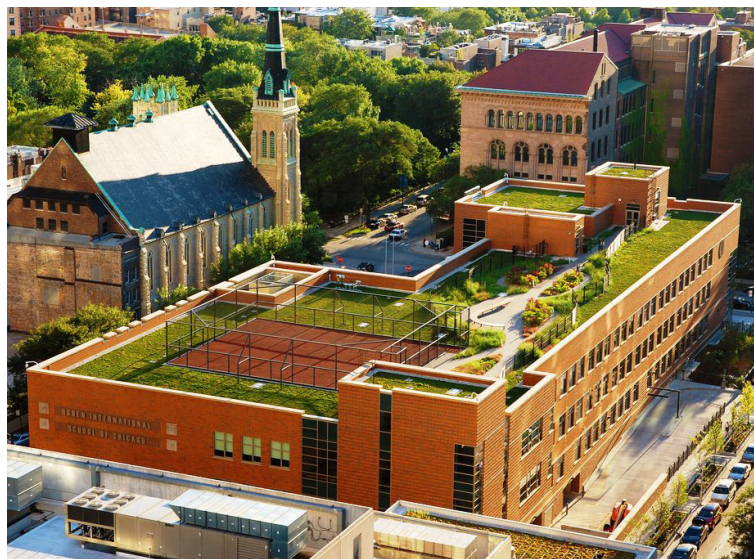


Figura 3.7. East Campus of the Ogden International School, Chicago (Estados Unidos).

Las cubiertas ajardinadas también se pueden entender como espacios aptos para el desarrollo de huertos urbanos, integrando la agricultura en las comunidades urbanas al mismo tiempo que aportan espacios cercanos donde producir comida local, ya que en las periferias de las ciudades cada vez quedan menos parcelas libres en cota cero, constantemente amenazadas por la urbanización y el desarrollo<sup>356</sup>. La comida

350 Sutton, R.K. 2015.

351 Huang, C.C., Busch, C., He, D., et al. 2015.

352 Ajuntament de Barcelona. 2015.

353 Ibídem.

354 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

355 Ibídem.

356 Ibídem.



local reduce las emisiones de CO<sub>2</sub> al limitar los desplazamientos del lugar de producción al de consumo, a la vez que mejora la educación ambiental y nutricional, aunque requiere de un mantenimiento y un cuidado mayor que otras cubiertas ajardinadas o que una cubierta tradicional<sup>357</sup>.

Un ejemplo de este uso de las cubiertas ajardinadas se encuentra en Recife (Brasil), donde la Comunidad de Pequeños Profetas (CPP) ha conseguido construir 400 m<sup>2</sup> de plantación de alimentos en los tejados de las favelas (Figura 3.8), con la intención de empoderar a la población en riesgo de pobreza extrema y exclusión social<sup>358</sup>, respondiendo a una problemática que también se recoge en el segundo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible<sup>359</sup> (véase apartado 2.5.2). De acuerdo con Demetrius Demetrio, impulsor del proyecto, el cultivo de vegetales en los tejados de la barriada de favelas, incluso la producción de miel, “no sana el hambre, pero mejora lo que comen las familias. Y comer bien mejora la autoestima”<sup>360</sup>.



Figura 3.8. Huertos en las cubiertas de las favelas de Recife (Brasil).

357 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

358 Álvarez, R.J. 2019.

359 Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030. 2021.

360 Álvarez, R.J. 2019.



### 3.3 CARACTERÍSTICAS ECONÓMICAS

A nivel económico, como tercer pilar de la sostenibilidad, las cubiertas ajardinadas aumentan la longevidad de la cubierta a la vez que implican beneficios económicos relevantes a lo largo de su vida útil<sup>361</sup>. También es importante destacar que el espacio público atractivo, como puede ser una cubierta ajardinada intensiva, aumenta la vitalidad económica de su entorno, e influye también en el aumento del valor de todo el edificio, aunque estos beneficios económicos siempre son difíciles de contabilizar, especialmente antes de su construcción<sup>362</sup>. Aun así, Jim y Chen<sup>363</sup>, en sus evaluaciones del impacto económico del desarrollo sostenible y ambiental en Guangzhou (China), obtuvieron datos relevantes respecto a los beneficios económicos, como por ejemplo que las vistas a espacios verdes o la proximidad a espacios con cuerpos de agua aumentaban el valor de las viviendas en un 7,1 % y un 13,2 %, respectivamente. Aunque también destacan que la usabilidad de los espacios verdes de la ciudad es económicamente más atractiva que su simple proximidad.

En el caso de estudiar los costes y beneficios de una cubierta ajardinada, resulta de vital importancia no analizar solo los costes y beneficios durante la fase de construcción, sino también a lo largo de su vida útil, ya que si se consideran solo los datos iniciales a corto plazo el balance de costes y beneficios no sale rentable y puede condicionar la elección del sistema de cubierta. Teng *et al.*<sup>364</sup> consideraron que estos mayores costes de construcción, en su estudio de la implementación de las cubiertas ajardinadas en Malasia, se podían deber a la poca extensión de estos sistemas, con pocas empresas de materiales e instalación, poca competencia, precios elevados y escasos técnicos expertos en la instalación de cubiertas ajardinadas. En cambio, a largo plazo, los beneficios son mayores a los costes en un porcentaje mucho mayor que en las cubiertas tradicionales, llegando a compensar el mayor coste inicial de una cubierta ajardinada. Este estudio a lo largo de la vida útil, que en España se sitúa entre 50 y 100 años sin considerar mejoras gracias a un buen mantenimiento, rehabilitaciones, etc., combinado con un estudio de los beneficios ambientales y sociales públicos, influirá notablemente en la posibilidad de éxito de las cubiertas ajardinadas en el ámbito privado<sup>365</sup>.

Como ya se ha comentado en el apartado 3.1.2.2.1, la cubierta ajardinada es especialmente beneficiosa en cuando a la reducción en el consumo de energía para refrigeración o calefacción en el caso de instalarse en edificios rehabilitados cuya envolvente previa tenía unas pésimas características térmicas. Esta reducción en el consumo energético se traduce en una reducción del gasto económico para los usuarios del edificio a lo largo de la vida útil de la cubierta<sup>366</sup>. Por lo tanto, se deben estudiar cuidadosamente las condiciones térmicas del edificio existente para valorar los beneficios a alcanzar y compararlos con el mayor coste de instalación y de mantenimiento de una cubierta ajardinada<sup>367</sup>. La combinación de una cubierta ajardinada con paneles solares también puede aportar beneficios suficientes para compensar los costes adicionales de instalación, pero el hecho de que estos paneles también funcionen bien en cubiertas reflectantes no le permite a la cubierta ajardinada desmarcarse como mejor opción de instalación conjunta con paneles solares, desde un punto de vista meramente económico<sup>368</sup>.

Parece que, a la hora de convencer a entidades privadas de la instalación de cubiertas ajardinadas, las ventajas económicas no resultan tan influyentes como el posible uso como un jardín<sup>369</sup>. En este caso, es deseable el uso de cubiertas intensivas, accesibles y con mayor posibilidad de variedades vegetales y diseños espaciales, mientras que las cubiertas extensivas pueden aportar un mayor valor estético y psicológico al edificio, pero no suelen ser accesibles ni se emplean a modo de jardín<sup>370</sup>. Pero en el deseo de instalar un jardín en la cubierta se genera una contradicción con la optimización de recursos mediante el uso de las cubiertas ajardinadas en la rehabilitación para reducir en el consumo de energía, ya que el empleo de cubiertas

361 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

362 Huang, C.C., Busch, C., He, D., *et al.* 2015.

363 Jim, C.Y., Chen, W.Y. 2006.

364 Teng, T.V., Kasim, N., Zainal, R., *et al.* 2021.

365 Van der Meulen, S.H. 2019.

366 Mohammadi, K., Sobouti, H. 2016.

367 Berardi, U., GhaffarianHoseini, A.H., GhaffarianHoseini, A. 2014; Zimmermann, A. 2015.

368 Zimmermann, A. 2015.

369 Van der Meulen, S.H. 2019.

370 *Ibíd.*



intensivas implica que la estructura del edificio debe soportar mayores cargas, para las cuales quizá no está preparada, lo que implicaría un sobrecoste de construcción relacionado con el refuerzo estructural (Tabla 3.1). Este tipo de cubiertas intensivas, con un mayor valor social y colectivo pueden emplearse también en espacios más accesibles y sencillos estructuralmente, para que la carga de la cubierta y su uso no suponga un problema. Algunos ejemplos son los ajardinamientos a cota cero sobre aparcamientos subterráneos o en interiores de manzanas, donde solo se edifica la planta baja, habitualmente con usos comerciales.

TIPO DE USO PARA CUBIERTAS PLANAS	CARGA DISTRIBUIDA PARA LA CANTIDAD DE AGUA MÁXIMA (kg/m <sup>2</sup> )
Cubierta ajardinada extensiva	120-225
Cubierta ajardinada semiintensiva	150-450
Cubierta ajardinada intensiva	> 650
<b>CARGAS ADICIONALES</b>	
Árboles hasta 10 m de altura	60
Árboles hasta 15 m de altura	150
<b>SOBREGARCAS</b>	
Nieve	40
Acceso solo para mantenimiento	100
Acceso privado	150
Acceso al público	200-500 (depende del uso)
Tráfico y aparcamiento de vehículos ligeros (peso total < 3T)	200

Tabla 3.1. Valores aproximados de cargas distribuidas para cubiertas, con capacidad máxima de agua almacenada (kg/m<sup>2</sup>).

Carter y Keeler<sup>371</sup> calcularon que una cubierta ajardinada es entre un 10-14 % más cara que una cubierta tradicional, comparando todos los costes y beneficios a lo largo de un ciclo de vida de 60 años. Pero también identificaron que si el coste de la energía aumentara en un futuro; la prevención de inundaciones y el cuidado del agua de tormentas se volviera una prioridad pública; o el coste de la construcción disminuyera, al menos en un 20 %, debido a una mayor estandarización o desarrollo de las técnicas relacionadas con las cubiertas ajardinadas, entonces las cubiertas ajardinadas se volverían más atractivas económicamente. Además, destacan que, habitualmente, en estas evaluaciones económicas no se contabilizan gran parte de los beneficios ambientales y sociales, por lo que se podría fomentar el uso de las cubiertas ajardinadas introduciendo estos beneficios en el proceso de decisión. Es por ello que se debe tener en cuenta que a pesar de que los costes iniciales de construcción de una cubierta ajardinada sean mayores que en una cubierta tradicional, sus propiedades son capaces de generar beneficios ambientales y sociales difíciles de expresar en valores monetarios, y que son capaces de revertir los contras económicos iniciales<sup>372</sup>.

En términos generales, a la hora de valorar el coste de construcción de una cubierta ajardinada, en el caso de los sistemas extensivos, un 48 % del coste total radica en el abono, el substrato y la lámina drenante, un 31 % depende de la elección de la vegetación, un 16 % se identifica con el coste de la lámina impermeable y la lámina antiraíces, y, en caso de instalarse, el riego solo implica entorno a un 5 %<sup>373</sup>. Por lo tanto, viendo el alto porcentaje que depende del substrato y la vegetación, se puede reducir considerablemente el coste de la construcción de una cubierta extensiva empleando vegetación local o un substrato que, por ejemplo, aproveche residuos de la construcción en su composición inorgánica (como los ladrillos rotos)<sup>374</sup>.

371 Carter, T., Keeler, A. 2008.

372 Shao, B., Du, X., Ren, Q. 2018.

373 Townshend, D. 2017.

374 Ibídem.





Pero, como ya se ha mencionado al hablar del ciclo de vida del edificio, el coste de una cubierta no solo implica el coste de construcción, sino que, de acuerdo con este análisis del ciclo de vida, también se deben considerar los costes de mantenimiento y los de eliminación de los componentes una vez la cubierta llega al final de su vida útil. Manso *et al.*<sup>375</sup>, en una revisión de la literatura al respecto, concluyen que el coste medio anual de mantenimiento es de 4,28 €/m<sup>2</sup> para cubiertas extensivas, 7,77 €/m<sup>2</sup> para semiintensivas y 5,64 €/m<sup>2</sup> para intensivas. Respecto al coste de eliminación, concluyeron una media de 12 €/m<sup>2</sup> para las cubiertas extensivas y de 26 €/m<sup>2</sup> para las intensivas.

Peri *et al.*<sup>376</sup> estudiaron también estos costes a lo largo de la vida útil de una cubierta ajardinada, determinando que el 36,1 % de los costes totales correspondía a los costes de construcción, mientras que el 59,3 % se debía a los costes de mantenimiento y solo el 4,6 % a los costes de eliminación. En sus investigaciones determinaron que, dentro del coste inicial de construcción, el mayor porcentaje se relacionaba con el sustrato (44 %), mientras que su reposición durante la vida útil de la cubierta también suponía el mayor porcentaje respecto al coste de mantenimiento (un 55 %, frente a un 16 % del coste de fertilización) al igual que también representaba el mayor porcentaje en cuanto al coste de eliminación (85 %). Esto se justificaba debido a que este material no se encuentra actualmente clasificado en el *Waste European Catalogue*, por lo que se hace más complicado identificar el mejor tratamiento de eliminación, ya que el empleo en la agricultura parece razonable, pero se debería estudiar previamente el contenido de contaminantes debido al uso de fertilizantes químicos durante el mantenimiento de la cubierta.

Banting *et al.*<sup>377</sup> también estudiaron el posible ahorro en el coste de una cubierta ajardinada, tanto en su periodo inicial de construcción, como a lo largo de su vida útil, en el caso de la ciudad de Toronto (Canadá). Determinaron, asimismo, ciertas recomendaciones para que los beneficios de implementación de las cubiertas ajardinadas fueran relevantes, como por ejemplo conseguir una cobertura del 75 % en cubiertas extensivas, instalar las cubiertas ajardinadas sobre cubiertas planas o configurar la capa de sustrato siempre con un espesor mínimo de 7,5 cm, entre otros.

Un posible incentivo, a parte del ahorro en el consumo energético, y bajo un punto de vista estrictamente económico, sería la aplicación de medidas más contundentes desde la administración pública<sup>378</sup> (véase apartados 2.5.1 y 2.5.4). Con la obligatoriedad de instalación de cubiertas ajardinadas, combinado con reducciones de impuestos, ayudas económicas o reducciones burocráticas, se podría conseguir un mayor uso de las cubiertas ajardinadas, a la vez que se obligaría indirectamente a los fabricantes de materiales y a los constructores a ajustar precios, haciéndolas más accesibles y competitivas<sup>379</sup>. Asimismo, la difusión de guías públicas de construcción y de mantenimiento de cubiertas ajardinadas también pueden favorecer la aplicación de estos sistemas en edificios privados<sup>380</sup>.

Otro beneficio que considerar, como ya se ha mencionado al inicio del capítulo, es la posibilidad de aumentar la vida útil de la cubierta. En una cubierta ajardinada se llega a doblar la longevidad de la lámina impermeable bituminosa en comparación con una cubierta tradicional, pasando de 15-20 años de vida útil a 30-50 años, ya que se limita el estrés térmico al que se encuentra sometida, disminuyendo así los costes asociados a reparaciones y sustituciones<sup>381</sup>.

375 Manso, M., Teotónio, I., Silva, C.M., *et al.* 2021.

376 Peri, G., Traverso, M., Finkbeiner, M., *et al.* 2012.

377 Banting, D., Doshi, H., Li, J., *et al.* 2005.

378 Van der Meulen, S.H. 2019.

379 Shin, E., Kim, H. 2019; Van der Meulen, S.H. 2019.

380 Shin, E., Kim, H. 2019.

381 Van der Meulen, S.H. 2019.



## 4. DISEÑO Y EJECUCIÓN DE LAS CUBIERTAS AJARDINADAS

La belleza de los edificios debería ir más allá de la piel. Se debe integrar de forma equilibrada los componentes ecológicos del proyecto en el propio proyecto. Se busca añadir forma a la función, más que función a la forma.

Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.

### 4.1 DISEÑO Y PARTICULARIDADES CONSTRUCTIVAS

Entre las pautas principales para el diseño y el mantenimiento de una cubierta ajardinada se encuentran: no superar el límite de carga de la estructura del edificio, proteger la integridad de la lámina impermeable, mantener la vegetación viva y con la mayor cubrición posible y mantener el sustrato en su posición y estado inicial<sup>1</sup>. Los factores más importantes que determinan la construcción de una cubierta, una vez consideradas las pautas principales, son<sup>2</sup>:

- **Arquitectónicos:** altura del murete perimetral en función del espesor total de la cubierta y la utilidad futura de la cubierta, cargas totales (considerando el sustrato en condiciones de saturación y la vegetación en su estado de madurez), diseño de la pendiente para conseguir un buen drenaje del agua, empleo de materiales resistentes y asegurar la accesibilidad y seguridad, como mínimo para trabajos de mantenimiento y control.
- **Agronómicos:** sustrato con capacidad de retención de agua, apto para el desarrollo de raíces y que evite los encharcamientos. En relación con la vegetación se deben seleccionar las especies adecuadas en función de los factores climáticos y ambientales del entorno.
- **Climáticos:** clima regional, microclima local, precipitaciones, exposición a la luz solar, periodos de sequía, periodos de heladas (con o sin cubrición de nieve) y vientos dominantes.

Una vez conocidas las características generales que influyen en la construcción de una cubierta ajardinada, de acuerdo con el estudio de todos estos factores, se debe prestar especial atención a las diferentes capas que componen el sistema, siendo la configuración habitual de este sistema multicapa, en el caso de una cubierta convencional (Figura 4.1), del interior hacia exterior, la siguiente: soporte resistente, formación de pendientes, barrera de vapor/lámina difusora de vapor, aislamiento térmico, lámina impermeable, lámina antiraíces, capa drenante/retenedora de agua, lámina filtrante, sustrato y vegetación. Este es el orden que se va a seguir en esta tesis para presentar en detalle las diferentes capas y sus particularidades, ya que este sistema dispone de una capa adicional (barrera de vapor) frente al sistema invertido. La cubierta ajardinada invertida dispone, por lo tanto, de una capa menos (Figura 4.2): soporte resistente, formación de pendientes, lámina impermeable, lámina antiraíces, aislamiento térmico, capa drenante/retenedora de agua, lámina filtrante, sustrato y vegetación. Para cualquier sistema de cubierta, y en aquellos casos que haya riesgo de incompatibilidades químicas entre capas o peligro de daño mecánico, se colocaran capas separados o de protección. Aunque no se consideren capas en sí mismas, se debe tener en cuenta también el sistema de riego y el de evacuación de agua.

1 Sutton, R.K. 2015.

2 DANOSA España. 2014.

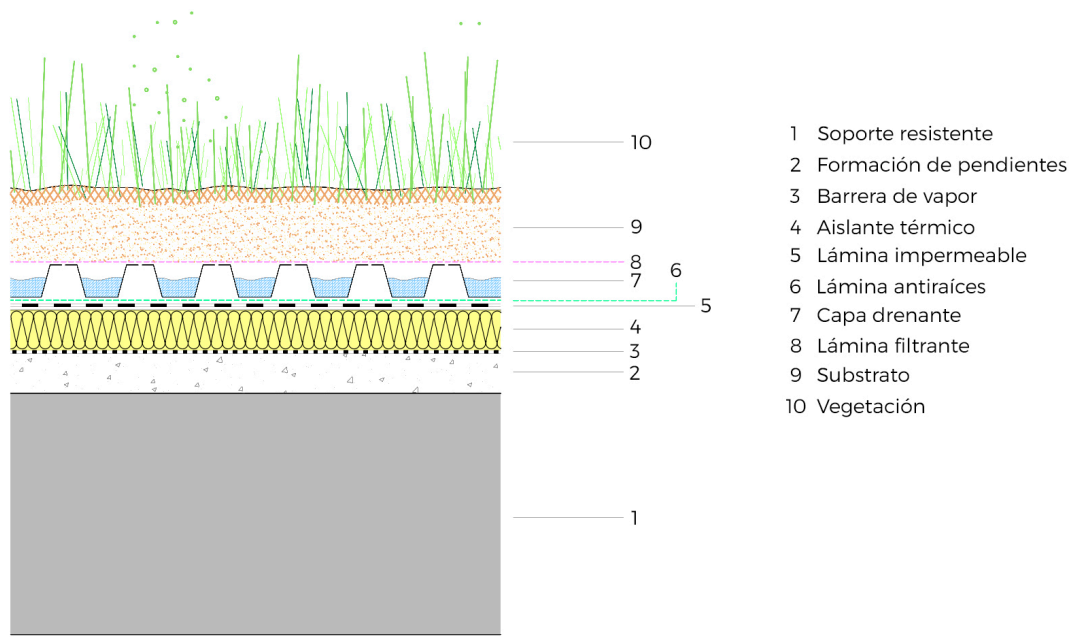


Figura 4.1. Sistema multicapa de una cubierta convencional.

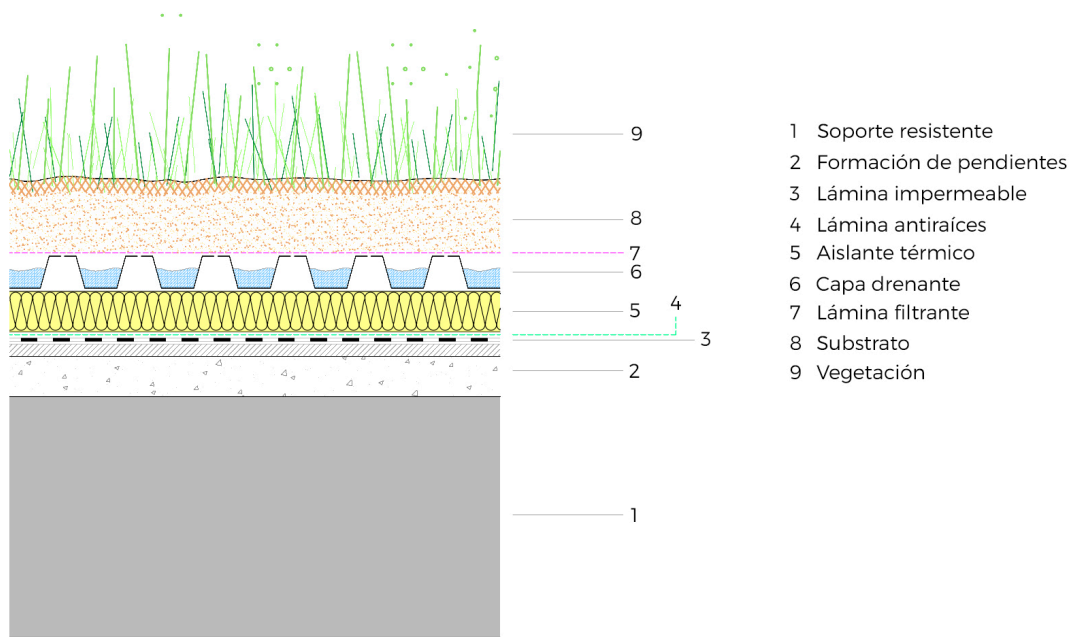


Figura 4.2. Sistema multicapa de una cubierta invertida.

#### 4.1.1 Soporte resistente

El soporte resistente de la cubierta ajardinada es la estructura sobre la cual se van a apoyar las sucesivas capas del sistema. Para su dimensionado se debe tener en cuenta la sobrecarga de nieve, viento, el tránsito de operarios para realizar operaciones de mantenimiento o reparaciones, la transitabilidad de la cubierta si fuera el caso y el peso propio de cada elemento de la cubierta<sup>3</sup>, considerando siempre las condiciones de máximo almacenamiento de agua en las capas. En el caso de que la cubierta esté a cota cero y puedan acceder vehículos se deberá tener en cuenta esta posibilidad en el cálculo de las cargas sobre la estructura<sup>4</sup> (véase tabla 3.1).

<sup>3</sup> Paradela, M.L.S. 2020a.

<sup>4</sup> Ministerio de la Vivienda. 1976.



Respecto al peso propio de la cubierta o carga muerta, se deben incluir en este peso todos los elementos y componentes asociados a la cubierta (peso del sistema ajardinado considerando el sustrato saturado de agua y la vegetación en su crecimiento máximo, elementos arquitectónicos que puedan ser instalados en la cubierta, pavimentos, etc.)<sup>5</sup>. Para el cálculo de la carga sobre una estructura se debe realizar un estudio detallado las capas y peso de la cubierta en cuestión, pero como valores orientativos, una cubierta extensiva pesa en torno a 60-180 kg/m<sup>2</sup>, una semiintensiva alcanza valores entre 150-350 kg/m<sup>2</sup> y las intensivas pesan más de 600 kg/m<sup>2</sup>, en función del diseño y los materiales empleados<sup>6</sup>. A la hora de instalar una cubierta ajardinada en un edificio existente se debe considerar bajo que normativa se realizó y que cargas puede soportar<sup>7</sup>, considerando la posible necesidad de realizar algún refuerzo estructural.

Una vez calculada cuál debe ser la capacidad de carga del soporte, la superficie de este debe encontrarse seca, limpia y carente de cuerpos extraños, para poder recibir las sucesivas capas de la cubierta<sup>8</sup>.

#### 4.1.2 Formación de pendientes

La formación de pendientes divide la cubierta en paños o faldones, cuyas superficies aportan la inclinación y la dirección adecuadas para facilitar la evacuación del agua (Figura 4.3). Los principales materiales para la conformación de esta capa son hormigón en masa o conglomerantes hidráulicos aligerados como los hormigones ligeros o celulares, todos ellos cumpliendo con una resistencia mínima a compresión de 300 kPa<sup>9</sup>. Los conglomerantes hidráulicos aportan menor peso a la cubierta, a la vez que las arcillas expandidas (Figura 4.4) (hormigón ligero) o las oclusiones de aire en el interior del hormigón producidas por los gasificantes añadidos (hormigón celular) le confieren a esta capa una cierta aportación como elemento aislante térmico<sup>10</sup>.



Figura 4.3. Relleno de los paños de la cubierta con el material de formación de pendientes.

5 Ajuntament de Barcelona. 2015.

6 Ibídem.

7 Cascone, S. 2019.

8 DANOSA España. 2014.

9 Cruz, A.I. 2017; Mas, Á. 2020.

10 Ibídem.



Figura 4.4. Arcillas expandidas.

La superficie de la formación de pendientes, en todos los casos, debe ser lisa y regular para no dañar las capas que se dispongan encima (lámina impermeable, barrera de vapor, lámina difusora de vapor o aislante térmico). En el caso de emplear hormigón en masa se puede conseguir una superficie lisa y regular con el propio material, por lo que, si la superficie tiene un buen acabado, las capas superiores se pueden disponer directamente sobre él. En cambio, en el caso del hormigón ligero o celular, es mucho más complejo, debido a la propia naturaleza del material, conseguir una superficie con las características deseadas. Es por ello que, cuando se conforma la pendiente con este tipo de hormigones se añade una capa de mortero de regulación, de entre 1-2 cm de espesor, como terminación para conseguir la regularidad y planeidad deseadas (Figura 4.5).



Figura 4.5. Capa de mortero de regularización para aportar planeidad a la superficie de acabado.

#### 4.1.3 Barrera de vapor

Como ya se ha indicado inicialmente, en una cubierta convencional, bajo el aislante térmico (cara caliente) y sobre de la estructura soporte de la cubierta o la formación de pendientes, existe el riesgo de condensación de vapor de agua (especialmente en invierno) debido al gran diferencial de temperatura que se produce entre las caras del aislante. En el caso de que en la cubierta convencional no haya capa aislante (porque solo con el espesor de substrato se cumplen las prescripciones térmicas de la normativa actual, aunque no sea recomendable) o cuando la cubierta sea invertida, no es que no exista este riesgo, sino que la lámina impermeable, colocada justo encima de la formación de pendientes, ya funciona como barrera de



vapor. Por lo tanto, cuando exista riesgo de condensación en la cara caliente del material aislante, según lo indicado en el CTE DB-HE<sup>11</sup>, se instalará una barrera de vapor. En el caso de que la formación de pendientes se realice con hormigón celular, la barrera de vapor se colocará bajo la formación de pendientes, ya que este tipo de hormigón es muy ávido de agua<sup>12</sup> (Figura 4.6).

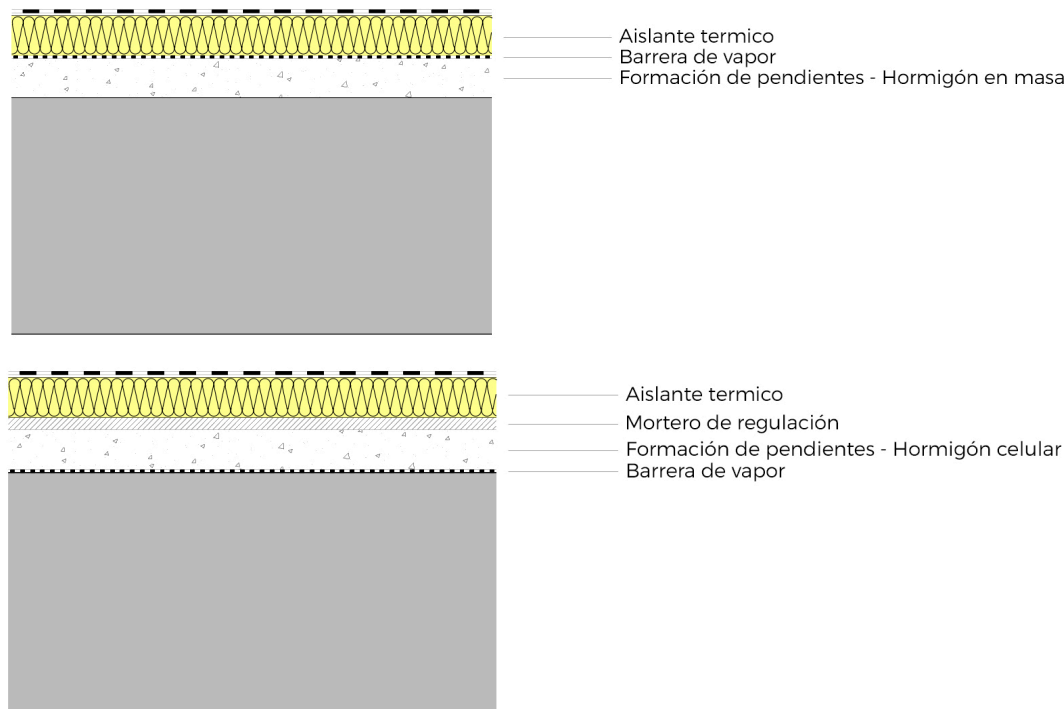


Figura 4.6. Colocación de la barrera de vapor en función del material de la formación de pendientes.

Estas láminas deben ser resistentes al envejecimiento y la corrosión frente a fluidos procedentes del hormigón. Antiguamente eran láminas delgadas de aluminio<sup>13</sup>, mientras que actualmente se emplean láminas bituminosas, sintéticas o de polietileno, entre otros<sup>14</sup>. Respecto a las de materiales bituminosos, estas son compatibles con las láminas impermeables de EPDM (caucho termopolímero de Etileno, Propileno y un Monomero Diénico), empleadas en esta tesis. Por otro lado, centrándonos en el ámbito de la rehabilitación, al retirar los materiales de acabado de una cubierta existente para instalar una nueva cubierta ajardinada, y en el caso de que la impermeabilización bituminosa existente se encuentre en buen estado, esta misma se puede mantener como barrera de vapor en el caso de instalar una cubierta ajardinada convencional. Debido a que la lámina impermeable bituminosa existente pueda tener orificios o grietas, es recomendable, por seguridad, disponer sobre ella una lámina difusora de vapor<sup>15</sup> (Figura 4.7).

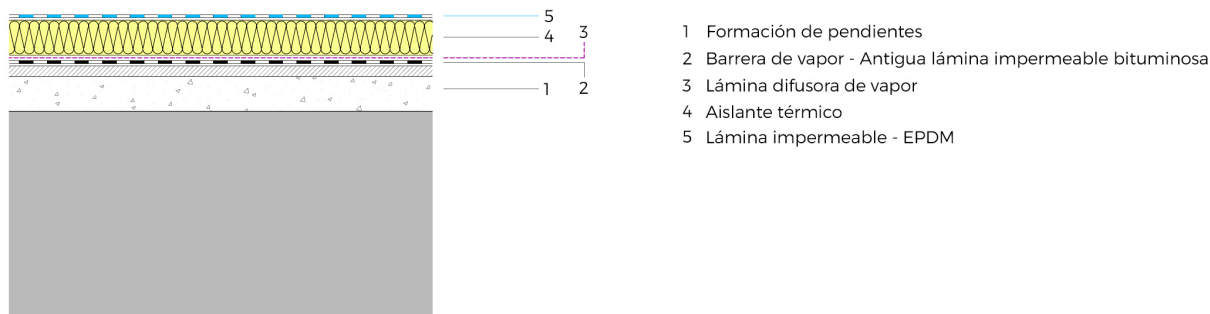


Figura 4.7. Barrera de vapor mediante reutilización de láminas impermeables bituminosas existentes en una cubierta convencional.

11 Ministerio de Fomento. 2022a.  
 12 Mas, Á. 2020.  
 13 Ibídem.  
 14 Paradela, M.L.S. 2020a.  
 15 AENOR. 2009.



#### 4.1.3.1 Lámina difusora de vapor

Esta lámina se dispone cuando la cantidad de vapor de agua que se puede generar en el espacio bajo cubierta es importante, como en el caso de saunas, piscinas climatizadas o gimnasios<sup>16</sup>. O en aquellos casos en los que, por las condiciones exteriores de contorno de la cubierta, se pueda llegar a acumular gran cantidad de vapor de agua en las capas de esta (rocío, cubiertas ajardinadas con almacenamiento de agua, grandes espesores de substrato, etc.). Habitualmente se trata de fieltros de polipropileno, de poliéster, fieltros con fibras de ambos materiales o planchas plásticas nodulares que permitan, en cualquier caso, la libre circulación del vapor de agua y eviten que ascienda o desciendan a otras capas de la cubierta<sup>17</sup> (véase apartado 4.1.10). Para los sistemas dispuestos en esta tesis, considerando el uso de impermeabilización realizada con láminas de EPDM, se emplearán materiales laminares, como por ejemplo la combinación de una lámina de plástico de masa mayor o igual que 120 gr/m<sup>2</sup> con un fieltro de fibra de vidrio de masa mayor o igual que 120 gr/m<sup>2</sup> (LP 120 + FFV 1/120) o con un fieltro sintético compacto de masa mayor o igual que 250 gr/m<sup>2</sup> (LP 120 + FS 1/250)<sup>18</sup>.

Por lo general, se disponen en cubiertas convencionales, en sustitución de la barrera de vapor, y en cubiertas invertidas, sobre el material aislante<sup>19</sup>, siempre que se produzcan los casos mencionados anteriormente de gran presencia de vapor de agua.

#### 4.1.4 Aislamiento térmico

Se trata de materiales con bajos valores de conductividad térmica, y que, como norma general, conforman la capa en la cual se producen mayores diferencias de temperatura entre sus caras. En el caso de cubiertas convencionales, el material aislante se coloca por debajo de la lámina impermeable, y, en cubiertas invertidas, se coloca sobre esta, protegiéndola de daños físico, reduciendo las fluctuaciones de temperatura a las que estará sometida y aumentando su durabilidad debido a un menor estrés térmico<sup>20</sup>. En el caso de cubiertas invertidas, las escogidas como óptimas para el desarrollo de la investigación de esta tesis, se deberán emplear materiales aislantes que sean resistentes a la humedad y que dejen pasar el agua, presentando valores de absorción de agua por inmersión, durante 28 días, menores que el 0,5 % de su volumen<sup>21</sup> (véase apartado 6.2.2). En este caso, para evitar el contacto entre el aislante térmico y la lámina impermeable se dispondrá de una capa separadora antiadherente y/o de separación química (véase apartado 4.1.10)<sup>22</sup>.

Aunque en cubiertas ajardinadas se considera que el sistema puede estar suficientemente aislado por sí mismo, en parte gracias al substrato y su inercia térmica, es conveniente y recomendable disponer una capa de material aislante, cuyo espesor dependerá del nivel de aislamiento térmico que se quiera conseguir según normativa y las condiciones climáticas exteriores. Por ejemplo, en el caso de colocar espesores excesivos de aislante, aparte de suponer un coste adicional en el proceso constructivo, no se permiten los flujos de calor negativos, hecho indeseable por la noche cuando estos flujos se necesitan para regular la temperatura interior en días o climas cálidos, perdiendo calor y consiguiendo un enfriamiento del interior<sup>23</sup>.

En cubiertas ajardinadas se emplea, habitualmente, poliestireno extruido, que permite el paso del agua y es resistente a la humedad. En función del material empleado, cada uno deberá presentar una resistencia mínima a compresión (Tabla 4.1) de acuerdo con la norma UNE-EN 826:2013<sup>24</sup>.

16 Paradela, M.L.S. 2020a.

17 *Ibidem*.

18 AENOR. 2009.

19 AENOR. 2013a.

20 Liu, K. 2003.

21 DANOSA España. 2014.

22 *Ibidem*.

23 Cruz, A.I. 2017.

24 AENOR. 2013b.



FOTOGRAFÍA	TIPO DE AISLANTE	ORIGEN	FORMATO
	<p><b>Lana de roca (SW)</b></p>	<p>Mineral</p>	<p>Panel, rollo y a granel</p>
	<p><b>Lana de vidrio (GW)</b></p>	<p>Mineral</p>	<p>Panel, rollo y a granel</p>
	<p><b>Poliestireno expandido (EPS)</b></p>	<p>Sintético</p>	<p>Panel y a granel</p>
	<p><b>Poliestireno extruido (XPS)</b></p>	<p>Sintético</p>	<p>Panel</p>
	<p><b>Poliuretano o Polisocianurato (PUR)</b></p>	<p>Sintético</p>	<p>Panel y espuma</p>





<b>COSTE ENERGÉTICO<sup>1</sup> (MJ/kg)</b>	<b>CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (<math>\lambda</math>) (W/mK)</b>	<b>FACTOR DE RES. A LA DIFUSIÓN DEL VAPOR DE AGUA (<math>\mu</math>)</b>	<b>COSTE (€/m<sup>2</sup>)</b>	<b>BIODEGRADABLE</b>	<b>RECICLABLE<sup>2</sup></b>
15-25	0,03-0,05	1	<5	No	1
15-50	0,03-0,05	1-1,3	<5	No	2
75-125	0,029-0,053	20-40	<5	No	1
75-125	0,025-0,04	100-220	<15	No	1
70-125	0,025-0,04	60-150	<10	No	1





	<p><b>Perlita expandida (EPB)</b></p>	<p>Mineral</p>	<p>Panel, rollo, espuma y a granel</p>
	<p><b>Vidrio celular (CG)</b></p>	<p>Mineral</p>	<p>Panel y espuma</p>
	<p><b>Virutas de madera (WF)</b></p>	<p>Vegetal</p>	<p>Panel, proyectado y a granel</p>
	<p><b>Corcho (ICB)</b></p>	<p>Vegetal</p>	<p>Panel, rollo y a granel</p>
	<p><b>Cáñamo (HM)</b></p>	<p>Vegetal</p>	<p>Panel, rollo, proyectado y a granel</p>
	<p><b>Celulosa (CL)</b></p>	<p>Vegetal</p>	<p>Panel, rollo, proyectado y a granel</p>
	<p><b>Lana de oveja (SHW)</b></p>	<p>Animal</p>	<p>Rollo y a granel</p>



5-20	0,04-0,06	3-8	<5	No	0
10-75	0,035-0,055	Infinita	<60	Sí	3
5-25	0,038-0,107	1-10	<40	Sí	0-2
1-25	0,034-0,1	5-30	<25	Sí	0
1-40	0,039-0,045	1-2	<25	Sí	0
1-25	0,035-0,069	1-2	<25	Sí	3
10-40	0,035-0,05	1-2	<25	Sí	0



	<b>Fibra de coco (CF)</b>	Vegetal	Panel y rollo
	<b>Lino (FLX)</b>	Vegetal	Panel, rollo y proyectado
	<b>Algodón (CO)</b>	Vegetal	Rollo

<sup>1</sup> El coste energético hace referencia a la energía consumida durante los procesos de extracción de materia prima, fabricación, transformación y transporte asociado a los diferentes materiales.

<sup>2</sup> Reciclable:

- 0: En su fabricación no se emplean productos reciclables.
- 1: En su fabricación se emplean menos de un 25% de materiales reciclados.
- 2: En su fabricación se emplean entre un 25-50% de materiales reciclados.
- 3: En su fabricación se emplean más de un 75% de productos reciclados.

Tabla 4.1. Tipos de materiales aislantes y propiedades.

USOS	PLACAS AISLANTES RESISTENCIA MÍNIMA A LA COMPRESIÓN (KPa) Según Norma UNE-EN 826. 1 KPa = 101,97 Kg/m <sup>2</sup>		
	XPS (Poliestireno extruido)	PIR (Poliisocianuato)	LM (Lana mineral)
Transitable peatones	300	100	-
Transitable espacios públicos y deportivos	300	200	-
No transitable	300	100	60
Ajardinada*	300	100	-

\* En cubiertas ajardinadas se revisarán estos valores en función de la carga.

Tabla 4.2. Resistencia mínima a la compresión para materiales aislantes en cubiertas planas convencionales (kPa).

A continuación, se resumen los principales tipos de materiales aislantes y sus propiedades (Tabla 4.2), mostrándose en un pequeño esquema la posible ubicación de los materiales más comercializados dentro de dos secciones tipo de edificios con cubierta inclinada y cubierta plana ajardinada (Figura 4.8 y 4.9).





#### 4.1.5 Lámina impermeable

Se trata de una de las capas más importantes de la cubierta ajardinada, ya que protege a la estructura de la cubierta de la penetración del agua contenida en las capas superiores<sup>25</sup>. Se recomienda que se coloque correctamente sobre al soporte (véase apartado 4.2.2) y se sectorice su instalación para minimizar los problemas de filtraciones<sup>26</sup>. Se puede colocar directamente encima de la formación de pendientes, en el caso de que su superficie tenga una adecuada planeidad y regularidad (en el caso de las cubiertas invertidas), sobre una capa separadora o sobre el aislamiento térmico (en el caso de las cubiertas convencionales)<sup>27</sup>. Para las cubiertas invertidas, o sin aislamiento térmico, cuando la capa de formación de pendientes no tenga la regularidad suficiente, se deberá disponer una capa de motero de regularización (recomendable, en cualquier caso) con la intención de garantizar una superficie regular, lisa, sin protuberancias o materiales sueltos, con cantos o aristas redondeados y con una inclinación mínima de 1 % en la dirección de la recogida de agua<sup>28</sup>. Las láminas impermeables se pueden clasificar como<sup>29</sup>:

- **De base bituminosa.** Productos prefabricados laminares constituidos por una o varias armaduras recubiertas con másticos de betún modificado con polímeros, materiales antiadherentes y, en caso de quedar expuestas al ambiente, una protección adicional (autoprotegidas). Pueden emplearse en sistemas monocapa o bicapa. Las más habituales son:
  - Láminas prefabricadas de betún modificado por polímeros (LBM). Son las más empleadas en cubiertas planas, en formato de rollos de 1 m de ancho (Figura 4.10). Se pueden colocar en sistema adherido (con emulsión asfáltica sobre el soporte), no adherido o fijado mecánicamente, en función de la pendiente de la cubierta<sup>30</sup>.
  - Placas bituminosas. De uso principalmente como acabado exterior en cubiertas inclinadas, por lo que deben ser autoprotegidas. En caso de pendientes menores al 25 % se debe reforzar el sistema con una impermeabilización LBM, de superficie no protegida, bajo las placas bituminosas<sup>31</sup>.
  - Películas impermeables realizadas *in situ*. Productos líquidos que se aplican en capas de 1 mm de espesor que al secarse forman una película sólida, elástica e impermeable. No son recomendables en edificios por su espesor variable y la dificultad de control en su ejecución<sup>32</sup>.
- **De base polimérica/sintéticas.** Se emplean únicamente en sistemas monocapa, por lo que se suele disponer una capa separadora por encima y por debajo. Se colocan en sistema no adherido, semiadherido o fijado mecánicamente<sup>33</sup>. Las más comunes, de acuerdo con el CTE, se fabrican con<sup>34</sup>:
  - PVC (Policloruro de Vinilo). De elevada durabilidad, estabilidad dimensional, resistencia al punzonamiento y excelente flexibilidad.
  - EPDM (caucho termopolímero de Etileno, Propileno y un Monomero Diénico). De elevada resistencia a agentes atmosféricos, durabilidad y buen comportamiento flexible. Una característica destacable es que se pueden presentar en forma de grandes mantas capaces de cubrir espacios muy amplios (Figura 4.11).
  - FPO (Poliolefina termoplástica). Muy resistentes al punzonamiento, al calor, a los agentes químicos y a los rayos ultravioleta. Se pueden realizar en colores claros (más reflexivos) en el caso de que vayan a constituir la última capa visible de una cubierta reflectante.

En este caso de investigación se ha optado por la elección de un material impermeable de EPDM, ya que se trata de un material cuyas propiedades lo han convertido en una apuesta de futuro, a la vez que se

25 Cascone, S. 2019.

26 *Ibidem*.

27 Britto, C. 2001.

28 *Ibidem*.

29 Paradela, M.L.S. 2020a.

30 Mas, Á. 2020.

31 Mas, Á. 2021.

32 Paradela, M.L.S. 2020a.

33 AENOR. 2009.

34 AENOR. 2013c; Ministerio de Fomento. 2022b.



define como una solución más sostenible que las láminas bituminosas, empleadas más habitualmente en la impermeabilización de viviendas hasta la actualidad (véase apartado 6.2.1). Estas láminas serán de 1,2 mm de espesor efectivo, como mínimo (mientras que las láminas bituminosas tendrán, por lo general, espesores entre 3-4 mm<sup>35</sup>), y se trata de láminas resistentes a la penetración de raíces<sup>36</sup>. Aun así, es recomendable plantear la colocación de una lámina antiraíces adicional, quedando del lado de la seguridad (véase apartado 4.1.6). En referencia a esta última anotación, las láminas bituminosas no son, por sí mismas, resistentes a la penetración de raíces, necesitando obligatoriamente o de un tratamiento especial o de una lámina antiraíces adicional, además de presentar mayores inestabilidades químicas que las soluciones con láminas sintéticas<sup>37</sup>.



Figura 4.10. Impermeabilización de cubierta plana con rollos de LBM de 1 m de ancho.



Figura 4.11. Impermeabilización de cubierta plana mantas de EPDM de grandes dimensiones.

#### 4.1.6 Lámina antiraíces

El objetivo principal de esta lámina es la protección de la lámina impermeable y la estructura de la cubierta de la penetración de las raíces de la vegetación, que pueden dañar mecánica y químicamente estas capas del sistema<sup>38</sup>. Por ejemplo, si perforaran la lámina impermeable causarían filtraciones de agua. La función antiraíces puede ir incorporada en la propia lámina impermeable, como ocurre en el caso de las láminas EPDM, o se pueden emplear geotextiles de polietileno con función antiraíces que se deben caracterizar por una elevada resistencia a los microorganismos del sustrato, al agua almacenada en el sistema y contener

35 Cascone, S. 2019.

36 AENOR. 2009; AENOR. 2013c.

37 Ajuntament de Barcelona. 2015.

38 Vijayaraghavan, K. 2016.



repelentes<sup>39</sup>. La lámina antiraíces deberá cubrir la totalidad de la lámina impermeable, aunque haya zonas de la cubierta donde no se haya proyectado ajardinamiento<sup>40</sup>. En caso de ser necesaria, sobre la lámina antiraíces se pueden disponer capas separadoras necesarias para el correcto funcionamiento de la cubierta (véase apartado 4.1.10)<sup>41</sup>.

Habitualmente se emplean láminas de espesor menores a 4 mm y con una masa superior o igual a 300 g/m<sup>2</sup> <sup>42</sup> (Figura 4.12). También se pueden emplear pinturas antiraíces con base de alquitrán, aplicadas sobre la capa de protección o separación sobre la impermeabilización<sup>43</sup>. En ningún caso se puede emplear el hormigón como antiraíces, aunque se considere que el hormigón con tratamiento especial para ser impermeable ya está protegido de por sí contra raíces, pero se debe prestar especial atención aun así a las juntas estructurales<sup>44</sup>.

Cabe destacar que, en el caso de usar plantas con crecimiento fuerte de rizomas, como el bambú, se deben tomar más precauciones constructivas y la barrera antiraíces debe tener un mantenimiento especial<sup>45</sup>.



Figura 4.12. Lámina antiraíces de polietileno, espesor aproximado de 0,34 mm y masa de 320 gr/m<sup>2</sup>.

#### 4.1.7 Capa drenante

Después de la lámina impermeable, esta es la capa de mayor importancia en el sistema de la cubierta ajardinada, ya que se encarga de drenar el exceso de agua del sustrato, permitiendo el equilibrio de aire y agua que asegure una correcta ventilación de las raíces y desarrollo de la vegetación<sup>46</sup>. Para ello, las capas drenantes siempre deben poseer aberturas para la ventilación y canales de evacuación de agua (aliviaderos) que aseguren una distancia entre el agua almacenada y el sustrato, evitando que las raíces se pudran y permitiendo que *respiren*<sup>47</sup> (Figura 4.13). Además, al permitir retirar el agua extra, disminuyen las cargas de la cubierta, protegen la lámina impermeable y mejoran el comportamiento térmico<sup>48</sup>. En el caso de disponer zonas pavimentadas, se recomienda que la capa drenante, al igual que la filtrante y la antiraíces, tengan continuidad bajo estas superficies, permitiendo el flujo de agua sin obstáculos<sup>49</sup>. Adicionalmente, esta capa

39 Britto, C. 2001; Vijayaraghavan, K. 2016.

40 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

41 FLL. 2018.

42 Cruz, A.I. 2017; Vijayaraghavan, K. 2016.

43 Britto, C. 2001.

44 FLL. 2018.

45 FLL. 2018; Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

46 Cascone, S. 2019.

47 Ajuntament de Barcelona. 2015.

48 Cascone, S. 2019.

49 Zimmermann, A. 2015.





puede tener una función retenedora de agua, minimizando o eliminando la necesidad de riego, a la vez que reduce el consumo de agua de cubierta (véase apartado 4.1.7.1)<sup>50</sup>.

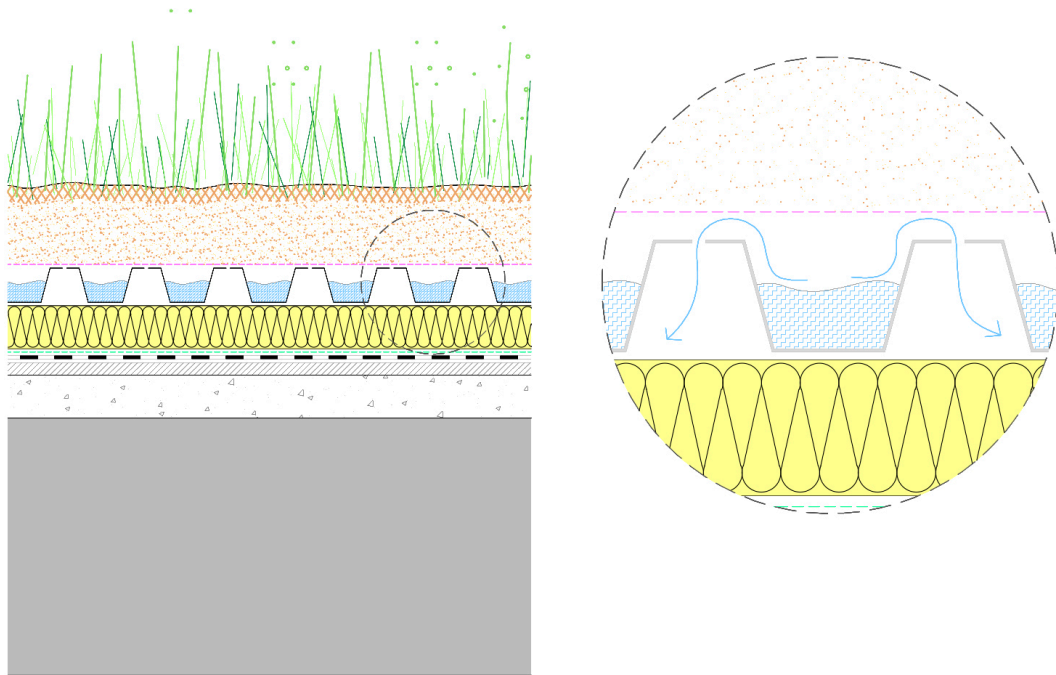


Figura 4.13. Aliviaderos en lámina drenante de paneles nodulares plásticos, con detalle.

Los principales materiales empleados como capa drenante son:

- **Materiales granulares.** Compuestos por fragmentos minerales (arcillas expandidas, gravas, etc.) o reciclados (ladrillos triturados, gomas de ruedas de coche, etc.)<sup>51</sup>. Solo se pueden emplear en cubiertas planas y con cubiertas inclinadas de pendientes menores a 10 %<sup>52</sup>, es decir, en pendientes entre el 2 % y el 10 %. Tienen una estructura porosa, por lo que también pueden emplearse como capa retenedora de agua, aunque deben cumplir una densidad mínima de 150 kg/m<sup>3</sup>, un espesor total de la capa de 6 cm<sup>53</sup> y una granulometría superior a 20 mm e inferior a 50 mm<sup>54</sup>. En el caso de disponer una capa drenante de estas características será necesario situar una capa separadora antipunzonante por debajo del material granular para no dañar las capas de soporte, como pueden ser la lámina impermeable o el aislante térmico (Figura 4.14). El almacenamiento de agua de estos materiales debe situarse entre 5 L/m<sup>2</sup> y 60 L/m<sup>2</sup><sup>55</sup>. En el caso de requerirse un elevado almacenamiento de agua, estos materiales son los más deseables<sup>56</sup>.
- **Paneles nodulares de materiales plásticos.** Su geometría conforma protuberancias que permiten acumular agua mientras se asegura el desagüe del exceso, permitiendo que el agua acumulada en las cavidades se evapore posteriormente y penetre por la lámina filtrante, donde se condensa y asciende por capilaridad a través del tejido de raíces del substrato<sup>57</sup> (Figura 4.15). El peso suele ser de unos 2 kg/m<sup>2</sup> y presenta espesores entre 2,5 y 12 cm, variando en función de esto su capacidad para almacenar agua, siendo como mínimo de 5 L/m<sup>2</sup><sup>58</sup>. Con los paneles nodulares es más fácil controlar la ratio agua/aire, presentan mayores resistencias mecánicas, mayor durabilidad, un mejor mantenimiento y una instala-

50 DANOSA España. 2014.

51 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

52 Cascone, S. 2019.

53 Ibídem.

54 Ministerio de la Vivienda. 1976.

55 AENOR. 2009.

56 FLL. 2018.

57 Cascone, S. 2019.

58 AENOR. 2009; Cascone, S. 2019.



ción más fácil y rápida, pero son más costosos<sup>59</sup>. Uno de los problemas más graves de este tipo de capas drenantes es que se secan de una manera drástica y no almacenan nutrientes, mientras que los materiales granulares se secan de manera progresiva y pueden dar un aviso a las plantas para que adecuen su consumo de agua en función de la que haya disponible<sup>60</sup>. Se colocan con solapes de 10-12 cm<sup>61</sup> y son resistentes a la descomposición y los microorganismos<sup>62</sup>.

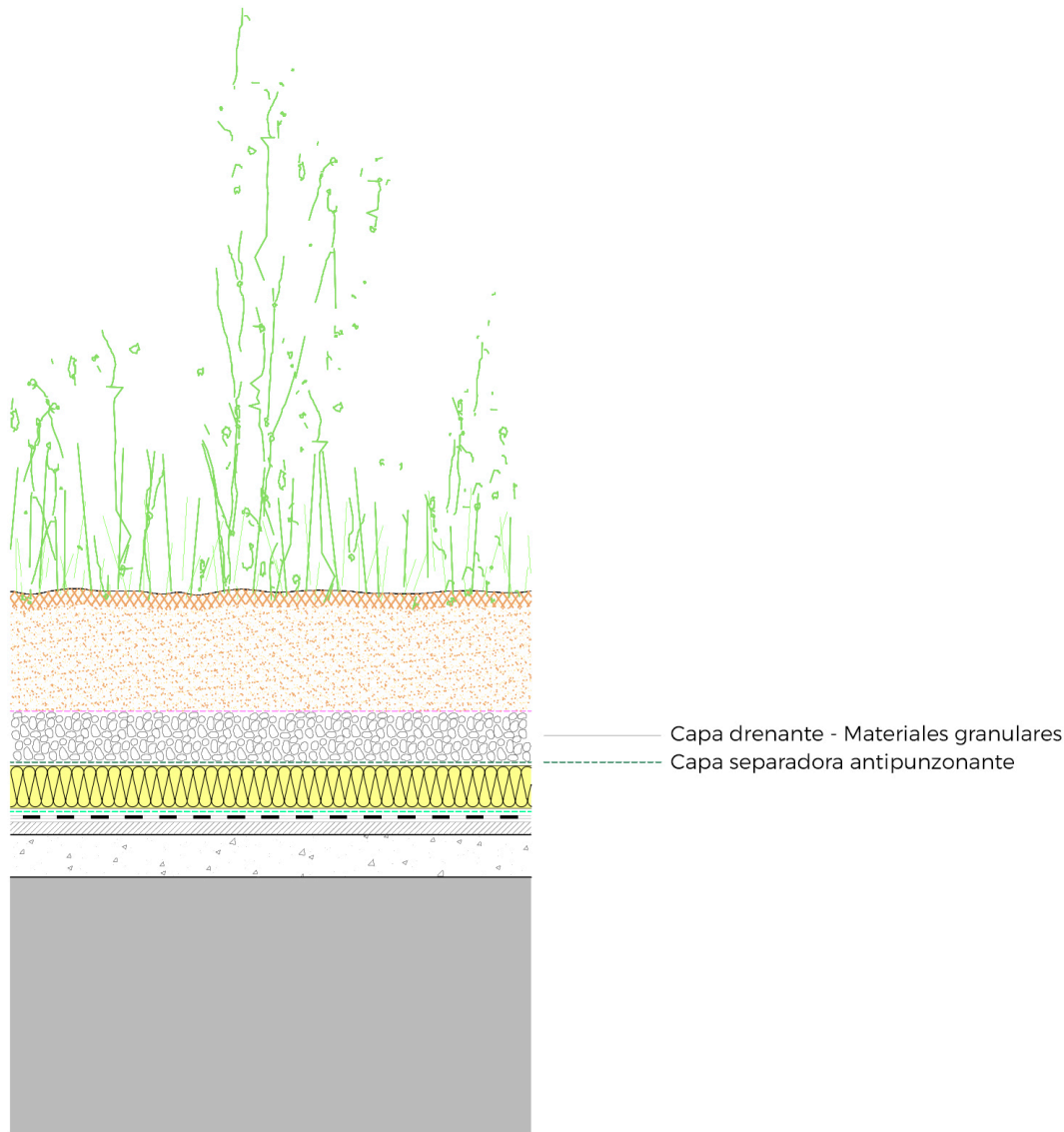


Figura 4.14. Capa drenante realizada con materiales granulares, con disposición de capa separadora antipunzonante bajo ella.

- **Lana de roca.** Permite la penetración de las raíces, retiene agua y la cede a las plantas, al mismo tiempo que escurre el exceso<sup>63</sup> (Figura 4.16). Se emplea en sistemas que requieren mucha ligereza, ya que la lana de roca puede sustituir, completa o parcialmente, al substrato, aunque en este caso se necesitaría de una capa final de grava para evitar que el viento arrancara la vegetación<sup>64</sup>. Un ejemplo de este caso es el sistema de cubiertas ajardinadas en autobuses, desarrollado por la empresa Phytokinetic y aplicado en Palma de Mallorca, Barcelona y Girona (España)<sup>65</sup>. En este caso, se sustituye un posible substrato vegetal por un soporte hidropónico con disoluciones minerales en forma de espuma o lana de roca,

59 Cascone, S. 2019.

60 Llopis, M.T. 2010.

61 DANOSA España. 2014.

62 FLL. 2018.

63 Llopis, M.T. 2010.

64 Ibídem.

65 Teknautas. 2015.



permitiendo que el conjunto sea mucho más ligero<sup>66</sup> (Figura 4.17). Aun así, los principales problemas de la lana de roca son la inexistente retención de nutrientes y la elevada energía incorporada debido a su proceso de fabricación<sup>67</sup>.

- **Materiales esponjosos.** Puede provenir del reciclaje de ruedas de coche (véase apartado 3.1.2.4) o productos similares, aunque a pesar de sus altas capacidades drenantes, no presenta una elevada retención de agua ni de nutrientes<sup>68</sup>.

La elección del tipo de material o sistema drenante dependerá del flujo hidráulico y de la carga vertical que vaya a tener que soportar, ya que a lo largo de su vida útil se va a producir compactación o deformación<sup>69</sup>. Para la elección también se debe considerar que los materiales mencionados se pueden emplear combinados, como por ejemplo rellenando las cavidades de los paneles nodulares con materiales granulares, aumentando así la resistencia a compresión del conjunto y haciendo esta solución viable para el caso de cubiertas intensivas de gran espesor y peso<sup>70</sup> (Figura 4.18).

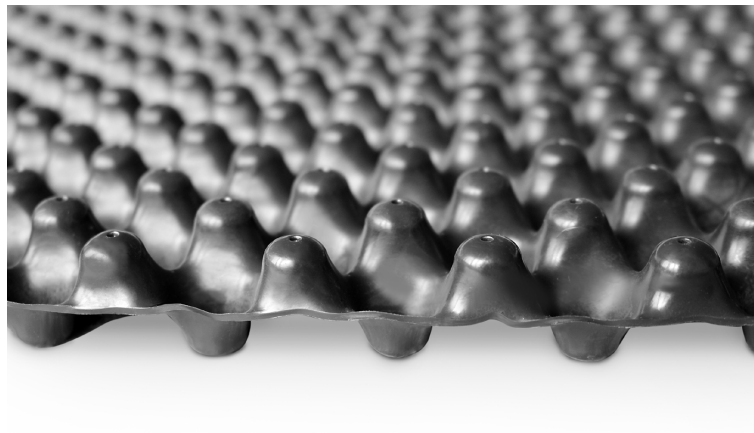


Figura 4.15. Capa drenante realizada con paneles nodulares plásticos con aliviaderos en la parte superior.



Figura 4.16. Capa drenante y sustrato realizadas con lana de roca.

66 Teknautas. 2015.

67 Llopis, M.T. 2010.

68 Ibídem.

69 Cascone, S. 2019.

70 Zimmermann, A. 2015.



Figura 4.17. Cubierta ajardinada ligera en la cubierta de un autobús, empleando lana de roca.

En el caso de instalar una lámina impermeable EPDM, se recomienda, en base a la normativa aplicable<sup>71</sup>, la instalación de los sistemas drenantes que se indican en la tabla 4.3 y 4.4. En sistemas de cubiertas extensivas, con inclinaciones mayores al 10 % y una vegetación que no exceda los 25 cm de altura, puede no instalarse una capa drenante propiamente dicha, aunque es recomendable<sup>72</sup>. Por otro lado, en edificios de poca escala, como el caso de edificios residenciales, se considera que los materiales granulares son suficientes para cumplir con los requisitos necesarios<sup>73</sup>. Vijayaraghavan et al.<sup>74</sup> emplearon capas de 5-15 cm de guijarros de arcilla como capa drenante en la instalación piloto de una cubierta, mientras que Pérez et al.<sup>75</sup> recomiendan el uso de migas de goma como material drenante más sostenible.

SISTEMAS DRENANTES	
Substrato de cubierta ajardinada	Lámina filtrante
Capa drenante: Áridos R 6 / HPLA 6 / LS 6	Lámina antiraíces + Lámina impermeable
Substrato de cubierta ajardinada	Lámina filtrante
Capa drenante: Áridos M 6 / HP 6 / HPL 6	Capa separadora antipunzonante
Capa drenante: Áridos M 6 / HP 6 / HPL 6	Lámina antiraíces + Lámina impermeable
Substrato de cubierta ajardinada	Capa drenante: HFF 6 / HPLA 6 / LSF 6
Capa drenante: HFF 6 / HPLA 6 / LSF 6	Lámina antiraíces + Lámina impermeable
Pavimento fijo, pavimento flotante o grava	Capa drenante: Áridos R 6
Capa drenante: Áridos R 6	Lámina antiraíces + Lámina impermeable

Tabla 4.3. Diferentes sistemas drenantes en función de la sucesión de capas de las cubiertas ajardinadas.

71 AENOR. 2009.

72 Britto, C. 2001.

73 Vijayaraghavan, K. 2016.

74 Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M., Balasubramanian, R. 2012.

75 Pérez, G., Vila, A., Rincón, L., et al. 2012.



DESIGNACIÓN	COMPOSICIÓN
ÁRIDOS R/M 6	Capa de áridos de canto rodado (R) o de machaqueo (M), con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> y menor a 60 L/m <sup>2</sup> .
HFF 6	Compuesto formado por hilos sintéticos, acabados en ambas caras con un fieltro filtrante, con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> .
HP 6	Capa de hormigón poroso, con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> y menor a 60 L/m <sup>2</sup> .
HPL 6	Losa prefabricada con al menos una capa de hormigón poroso, con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> y menor a 60 L/m <sup>2</sup> .
HPLA 6	Losa filtrante con capa de hormigón poroso y base aislante, apta para cubiertas invertidas, con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> y menor a 60 L/m <sup>2</sup> .
LS 6	Panel sintético rígido preformado (nodular), con protuberancias en, al menos, una de sus caras y con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> .
LSF 6	Compuesto formado por un panel sintético rígido preformado (nodular), con protuberancias en, al menos, una de sus caras, y un fieltro filtrante unido a las protuberancias, con capacidad de almacenamiento de agua mayor a 6 L/m <sup>2</sup> .

Tabla 4.4. Composición de los productos empleados para los sistemas drenantes.

En el caso de que se empleen materiales granulares, la porción con diámetro (d) < 0,063 mm no debe ser mayor al 10 % de la masa. La distribución de tamaños dependerá de la profundidad del sustrato<sup>76</sup>:

- Para espesores de sustrato entre 4-10 cm, los diámetros deben estar comprendidos entre 2/8 y 2/12 mm.
- Para espesores entre 10-20 cm, los diámetros deben estar entre 4/8-8/16 mm.
- Para espesores de más de 20 cm, los diámetros deben estar entre 4/8 y 16/32 mm.

En cualquier caso, sea cual sea el material empleado, la capa de drenaje debe tener aproximadamente el mismo pH que el sustrato, que, para cubiertas intensiva, semiintensivas y extensivas debe estar entre 6,0 y 8,5, y en el caso de que se trate de sustrato para césped debe mantenerse entre 5,5 y 7,5<sup>77</sup>. En los casos en que la vegetación requiera de un suelo ácido, el valor del pH se debe especificar<sup>78</sup>. En cuanto al contenido de cal en el sustrato y la capa drenante, no debe superar los 2,5 gr/L en cubiertas intensivas y 3,4 gr/L en cubiertas extensivas, aunque se debe tratar de conseguir el menor valor posible debido al riesgo de contaminación ambiental por la lixiviación de la sal<sup>79</sup>. En el caso de plantas sensibles a la sal, el contenido de esta no debe superar 1 gr/L<sup>80</sup>.

Por último, se debe prestar especial atención a los daños causados por eflorescencias en las instalaciones de drenaje. No suele deberse a la estructura, sino a la disolución de carbonatos presentes en el hormigón o mortero empleados en la formación de pendientes, en las capas de regulación o en los encuentros de la cubierta ajardinada con las zonas de circulación, por lo que se debe tener especialmente en cuenta y aplicar el tratamiento adecuado en caso de emplear mortero u hormigón en estos casos<sup>81</sup>.

76 FLL. 2018.

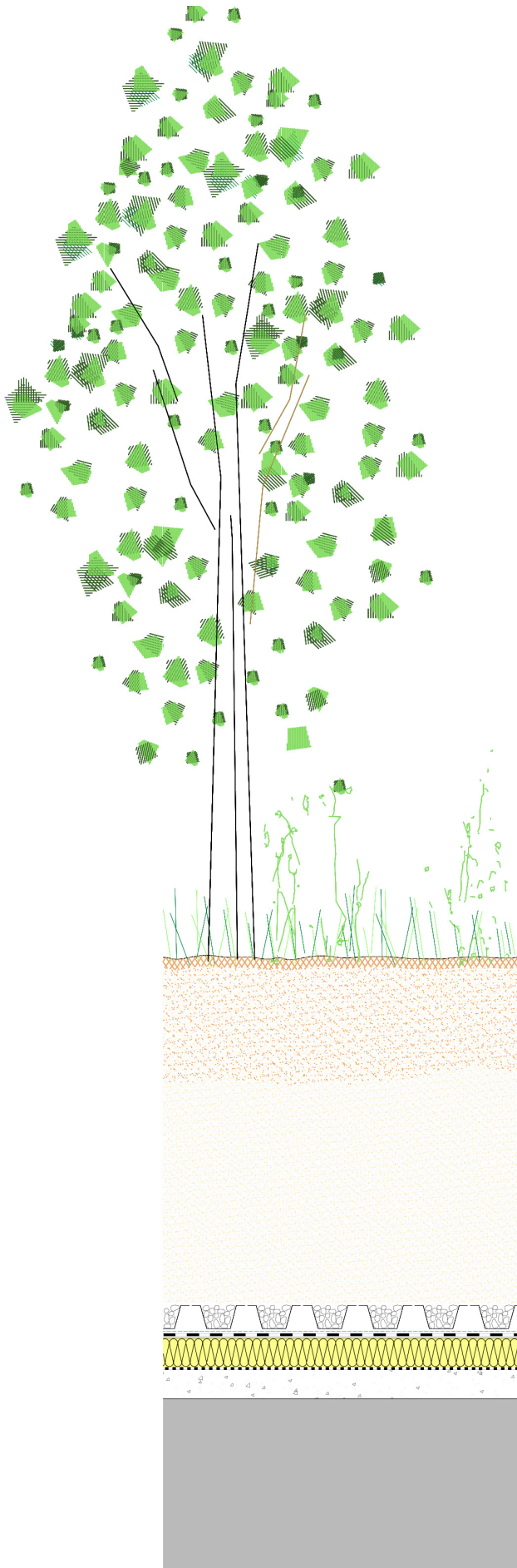
77 *Ibidem*.

78 *Ibidem*.

79 *Ibidem*.

80 *Ibidem*.

81 *Ibidem*.



Capa drenante - Panel nodular+Material granular

Figura 4.18. Capa drenante realizada con paneles nodulares rellenos con material granular.



#### 4.1.7.1 Capa retenedora de agua

La función de esta capa, que puede ir combinada con la capa drenante o sustituirla, es la de aumentar y mejorar la retención de agua de lluvia o de riego, acumulando también nutrientes<sup>82</sup> en caso de ser posible por el tipo de material o sistema. La acumulación de agua deseable dependerá del sistema de cubierta ajardinada: en una cubierta extensiva se debe evitar un excesivo almacenamiento de agua; en cubiertas semiintensivas el almacenamiento se produce principalmente en la capa drenante, aunque en climas secos se deberá plantear un sistema de riego para las épocas de sequía; y en una cubierta intensiva aunque el almacenamiento de agua en el sustrato y la capa de retención de agua y/o la capa drenante sea importante, se debe plantear necesariamente un sistema de riego. Por lo tanto, la acumulación de agua se puede producir en diferentes capas<sup>83</sup>:

- En la capa de drenaje, usando materiales granulares o paneles nodulares de mayor espesor. En el caso de cubiertas intensivas, principalmente, se plantea la colocación de una capa retenedora de mayor resistencia a compresión y capacidad de almacenamiento para mejorar la retención de agua del sistema sustrato-drenante.
- En el sustrato, añadiendo geles o materiales capaces de almacenar agua.
- En un depósito de almacenamiento protegido (combinación de cubierta aljibe con ajardinada o *polder roof*).

De acuerdo con lo anterior, se suelen emplear mantas absorbentes combinadas con la capa drenante y realizadas de diferentes materiales, como fibras sintéticas o lana de roca, pero en este caso cohesionada con componentes químicos que le confieren una elevada capacidad de absorción y retención de agua (hasta 20 L/m<sup>2</sup>) (Figura 4.19); placas nodulares de poliestireno expandido (EPS) colocadas con los nódulos pequeños hacia arriba, los cuales retienen aproximadamente 6 L/m<sup>2</sup> (dependiendo del tipo y espesor de los paneles), sirviendo al mismo tiempo como elemento de drenaje, de retención de agua y como capa de aislamiento térmico adicional (un elemento de 14 cm de espesor presenta una resistencia térmica de 1,5 W/m<sup>2</sup>C, correspondiente a unos 6,5 cm de aislamiento térmico)<sup>84</sup> (Figura 4.20); materiales granulares de poro abierto, que presentan una elevada capacidad de almacenamiento de agua<sup>85</sup> o geles incorporados al sustrato<sup>86</sup>.



Figura 4.19. Capa retenedora de agua de fibras de poliéster/polipropileno, de espesor aproximado 6 mm y una capacidad de retención de agua de 4 L/m<sup>2</sup>.

82 Britto, C. 2001.

83 FLL. 2018.

84 Britto, C. 2001.

85 FLL. 2018.

86 Britto, C. 2001.



En los sistemas de cubierta aljibe con cubrición vegetal, o *polder roof*, la retención de agua se produce en un depósito sobre la lámina impermeable, que permite almacenar agua bajo el sistema de cubierta ajardinada (normalmente colocada sobre una estructura de losas filtrantes sobre plots regulables en altura) y que ascienda por capilaridad, mediante un fieltro absorbente, hasta humedecer el sustrato<sup>87</sup> (Figura 4.21). Para evitar encharcamientos, asegurar una correcta descarga del exceso de agua y la ventilación de las raíces, se debe dejar una distancia mínima de 2 cm entre el máximo nivel de agua acumulada y la parte inferior de la losa filtrante<sup>88</sup>. En épocas de lluvias se recomienda que el agua almacenada esté por debajo del nivel máximo, ya que sino toda el agua nueva de lluvia será drenada directamente y a mayor velocidad<sup>89</sup>.



Figura 4.20. Panel rígido de EPS, de espesor aproximado 75 mm: colocación inferior para retención de agua (capacidad de retención de agua de 3 L/m<sup>2</sup>) o colocación superior en cubiertas inclinadas.

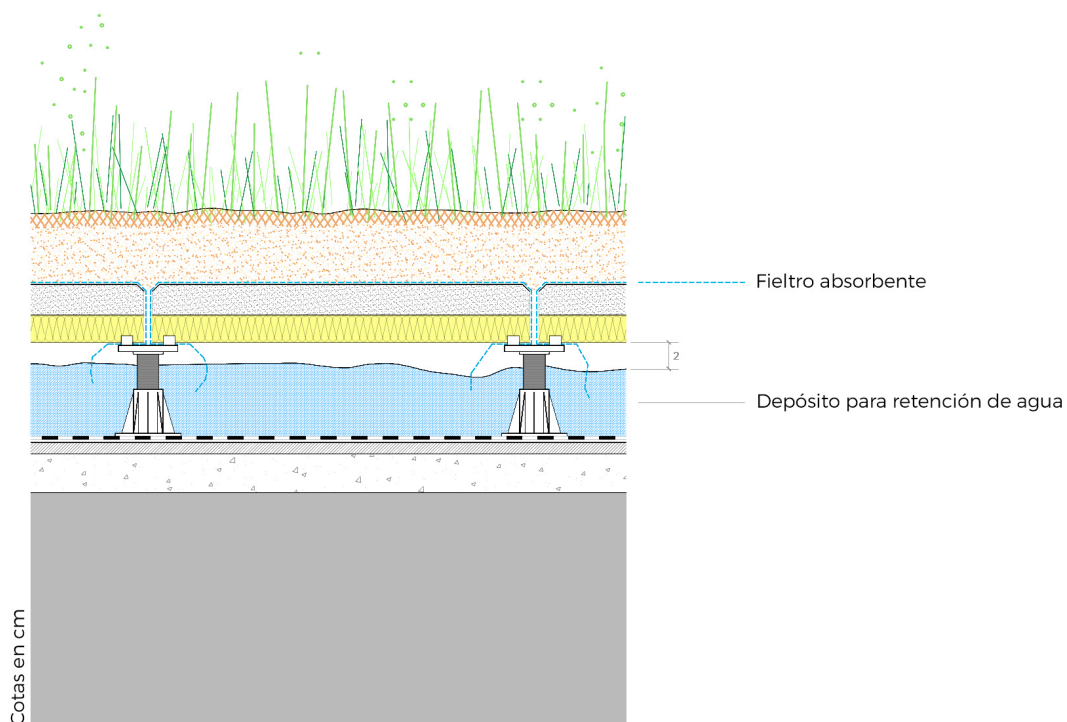


Figura 4.21. Depósito de retención de agua en una cubierta ajardinada aljibe o *polder roof*.

87 Britto, C. 2001.

88 FLL. 2018.

89 Ibídem.





Respecto al fenómeno de ascenso por capilaridad, Britto<sup>90</sup> determinó en sus investigaciones que se trata de un proceso lento, de dos o tres días para llegar al objetivo máximo. Pero al mismo tiempo, ocurre otro efecto, que denomina de *vasos comunicantes*, por el que el agua también desciende desde el substrato al depósito a través del fieltro absorbente, a mayor velocidad que el fenómeno de capilaridad (en torno a 5 minutos) y que provoca que se seque el substrato llevando el agua al aljibe con mayor eficacia de la que el agua asciende desde el aljibe. Es decir, cuando el substrato está seco, observó que el agua ascendía de manera lenta por capilaridad a través del fieltro absorbente, pero cuando el substrato está húmedo, como consecuencia de una lluvia reciente, el fieltro favorecía que se seque con más rapidez, descendiendo el agua hacia el aljibe.

#### 4.1.8 Lámina filtrante

Se coloca separando el substrato de la capa drenante y su función es evitar que pequeñas partículas del suelo lleguen a la lámina drenante y puedan obstruirla<sup>91</sup>. Para caracterizar las láminas filtrantes se habla de la apertura efectiva ( $O_{90,w}$ ), que indica el diámetro de la fracción de partículas para el cual el 90 % de las partículas quedan retenidas y al 10 % se les permite el paso<sup>92</sup>. Para las cubiertas ajardinadas, un paso efectivo adecuado se encontraría en el rango  $0,06 \text{ mm} \leq O_{90,w} \leq 0,2 \text{ mm}$ <sup>93</sup>.

Aun así, la lámina filtrante debe permitir una alta permeabilidad al agua (en torno a 10 veces más que el substrato) y tendrá un poder de absorción aproximado de  $1 \text{ l/sm}^2$ ; no debe impedir el paso de raíces y será resistente a los microorganismos (especialmente cuando se emplee abono de humus); tendrá una elevada resistencia a la tracción, elasticidad y fricción; debe colocarse con solapes entre láminas de 20 cm y se asegurará que asciende al menos 10 cm por encima de la superficie del substrato al llegar al perímetro de la cubierta o en puntos singulares<sup>94</sup>.

Los materiales más habituales empleados como lámina filtrante son<sup>95</sup>:

- Materiales granulares con una granulometría determinada.
- Geotextiles. Normalmente son los más empleados y se fabrican con fibras plásticas, habitualmente de polipropileno o poliéster<sup>96</sup> (Figura 4.22). Los fieltros de fibra de vidrio no son muy recomendables en este caso, ya que varias experiencias en países del norte de Europa demuestran que son atacados por el agua<sup>97</sup>.

De acuerdo con la normativa relacionada con la instalación de láminas impermeables sintéticas de EPDM en las cubiertas, en este caso ajardinadas, se recomienda el uso de un fieltro sintético con permeabilidad al agua perpendicular al plano mayor que  $15 \text{ mm/s}$ <sup>98</sup>.

La densidad mínima de la lámina filtrante será de  $100 \text{ gr/m}^2$ , aunque se recomienda que se sitúe entre  $100\text{-}200 \text{ gr/m}^2$  para substratos de hasta 25 cm de espesor. En el caso de espesores mayores, o cubiertas inclinadas, la lámina estará sometida a mayores tensiones, necesitando mayor resistencia y extensibilidad, por lo que se recomiendan densidades mayores a las mencionadas<sup>99</sup>.

90 Britto, C. 2001.

91 Cascone, S. 2019.

92 FLL. 2018.

93 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

94 Cascone, S. 2019; DANOSA España. 2014; FLL. 2018; Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Vijayaraghavan, K. 2016.

95 Cascone, S. 2019.

96 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021a.

97 Britto, C. 2001.

98 AENOR. 2009.

99 FLL. 2018; ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021a.



Figura 4.22. Lámina filtrante de polipropileno,  $O_{90}$  95  $\mu\text{m}$  y una densidad de 100  $\text{gr}/\text{m}^2$ .

#### 4.1.9 Substrato

El substrato es la capa con mayor influencia en el crecimiento de la vegetación, garantizando las condiciones físicas, químicas y biológicas para el desarrollo vegetal. Los parámetros principales del substrato se pueden dividir en físicos y químicos, siendo los primeros la densidad, el tamaño de partículas, la permeabilidad al agua, el máximo volumen de agua y el máximo volumen de aire en condiciones de saturación. Los parámetros químicos más importantes son el índice de pH, la conductividad eléctrica y la cantidad de materia orgánica<sup>100</sup>.

Las principales características que debe presentar un substrato son las siguientes, de acuerdo con diferentes investigaciones<sup>101</sup>:

- Alta estabilidad bajo diferentes condiciones ambientales.
- Poco peso, ligereza.
- Contenido mínimo de material orgánico.
- Distribución granulométrica adecuada.
- Buena aireación y propiedades de flujo.
- Alta conductividad hidráulica.
- Alta capacidad de retención de agua.
- Poca degradación y alta capacidad de sorción.
- Contribución a la mejora de la calidad del agua.
- Disponibilidad local fácil y que sea capaz de fomentar el desarrollo de varias especies vegetales.
- Coste efectivo.
- Resistencia a las heladas.

Debido a que ningún material de substrato puede cumplir todos estos requisitos al mismo tiempo, una optimización de su comportamiento se puede conseguir con la mezcla de materiales con diferentes características y en diferentes proporciones<sup>102</sup>. A continuación, se profundizará en algunas de estas características, de gran importancia para el correcto funcionamiento de la cubierta ajardinada. En primer lugar, en relación

100 Cascone, S. 2019.

101 Cruz, A.I. 2017; Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

102 Cascone, S. 2019.



con la **estabilidad**, hay que tener en cuenta que en los casos de sustratos que se deban proteger de la erosión y el deslizamiento, por elevada exposición a vientos, por precipitaciones, pendiente pronunciada de la cubierta, etc., se dispondrán mallas tridimensionales de nylon en la cubierta (Figura 4.23), disponiendo sobre estas el sustrato, con la intención de retenerlo en su lugar e impedir su desplazamiento<sup>103</sup>.



Figura 4.23. Protección del sustrato frente a la erosión mediante mallas tridimensionales.

Respecto a la **reducción del peso** sobre la cubierta, se recomienda para ello el uso de materiales inorgánicos de baja densidad en el sustrato<sup>104</sup>. De acuerdo con la guía de la FLL, el sustrato debería incluir solo un 4-8 % y 6-12 % de material orgánico en cubiertas extensivas e intensivas, respectivamente<sup>105</sup>. Por lo tanto, el sustrato es principalmente **material inorgánico** o mineral, aportando una menor densidad, una alta porosidad (75 %), una alta capacidad drenante en condiciones de saturación y una mejor ventilación de las raíces<sup>106</sup>. Estos componentes inorgánicos pueden ser de orígenes diversos, de acuerdo con Britto<sup>107</sup>:

- Origen natural y sin proceso de manufacturación, como son la grava, la arena, la tierra volcánica, el picón (o lapilli), etc.
- Origen natural y con proceso de manufacturación, como la lana de roca, la perlita o la arcilla expandida.
- Origen sintético, como el poliestireno en placas o en gránulos.

Los más usados son la piedra pómez, la zeolita, la escoria volcánica, la perlita o los ladrillos rotos, y deben presentar, en términos generales, un alto porcentaje de partículas de diámetro entre 2-4 mm<sup>108</sup>. Dentro de la propia configuración del sustrato se puede realizar una distinción entre una capa *superior* y una capa *inferior* (estratificación). Una de las funciones de esta separación por estratos o capas es la de controlar la cantidad de material orgánico y evitar problemas de hundimiento o putrefacción, disponiendo una capa inferior con menor cantidad de material orgánico y una superior con mayor proporción de este<sup>109</sup>. Especialmente en cubiertas intensivas es importante limitar este hundimiento (también llamado tasa de contracción), que se puede deber a la carga de la cubierta, la influencia del agua, la carga durante el mantenimiento, etc.<sup>110</sup> En cualquier caso, el hundimiento no puede superar el 10 % del espesor nominal en capas de espesor hasta 50 cm o, de media, más de 5 cm en capas de espesor mayor a 50 cm<sup>111</sup>.

A pesar de las ventajas del material inorgánico, y de que diferentes estudios recomiendan usar una proporción mayor al 80 % en la configuración del sustrato, es crucial incorporar componentes orgánicos para aportar nutrientes a la vegetación<sup>112</sup> (Figura 4.24).

103 Llopis, M.T. 2010.

104 Cascone, S. 2019.

105 FLL. 2018.

106 Cascone, S. 2019.

107 Britto, C. 2001.

108 Cascone, S. 2019.

109 FLL. 2018.

110 *Ibidem*.

111 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

112 Cascone, S. 2019.



Figura 4.24. Composición de sustrato para cubierta ajardinada con materiales inorgánicos (cerámica y otros componentes minarles triturados) y orgánicos (compost vegetal y turba rubia).

El **material orgánico** que se ha empleado en mayor abundancia hasta el momento ha sido la turba, pero actualmente se requiere de un estudio de impacto ambiental previo a su utilización, por lo que se han buscado sustitutos, como los residuos forestales y agrícolas<sup>113</sup>. Los materiales más empleados, después de un correcto compostaje y control, son las cortezas de pino, las fibras de coco, las acículas de pino, la cáscara de arroz, los residuos de podas urbanas y los sarmientos de vid, aunque los residuos urbanos, debidamente compostados y estabilizados, también pueden utilizarse como aditivos fertilizantes en combinación con los elementos mencionados<sup>114</sup>. Los valores orientativos, según la guía de la FLL, de contenido de materia orgánica (gr/L) en el sustrato se pueden observar en la tabla 4.5, siempre considerando que ciertos tipos de vegetación podrían necesitar un contenido de materia orgánica diferente<sup>115</sup>.

CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (gr/L)					
Cubierta intensiva excepto césped		Cubierta intensiva con césped		Cubierta extensiva	
Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas
≤ 40	≤ 90	≤ 40	≤ 65	≤ 40	≤ 65

Tabla 4.5. Valores orientativos de contenido de materia orgánica (gr/L).

Una vez determinado el porcentaje de materia orgánica e inorgánica no se debe dejar de lado el estudio del **tamaño de partículas** del sustrato, especialmente importante ya que un suelo arcilloso limita el correcto drenaje, mientras que la presencia de arena tiende a minimizar los efectos de la compactación<sup>116</sup>. De acuerdo con la guía de la FLL, el contenido de limo y arcilla ( $d \leq 0,063 \text{ mm}$ ) no debe superar los valores de la tabla 4.6, mientras que el tamaño máximo de las partículas a emplear en cubiertas planas depende del espesor del sustrato (al igual que en el caso de los materiales granulares de la capa drenante), sin superar los siguientes valores<sup>117</sup>:

- Para espesores de sustrato de hasta 10 cm:  $d_{\text{max}} = 12,5 \text{ mm}$ .
- Para espesores de más de 10 cm:  $d_{\text{max}} = 16 \text{ mm}$ .
- Para un ajardinamiento con césped, será en cualquier situación un  $d_{\text{max}} = 8 \text{ mm}$ .

113 Britto, C. 2001.

114 Ibídem.

115 FLL. 2018.

116 Britto, C. 2001.

117 FLL. 2018.



LÍMITE DE LIMOS Y ARCILLAS (%)					
Cubierta intensiva excepto césped		Cubierta intensiva con césped		Cubierta extensiva	
Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas
≤ 10	≤ 20	≤ 10	≤ 20	≤ 10	≤ 15

Tabla 4.6. Contenido límite de limos y arcillas (% en masa) en el sustrato de cubiertas ajardinadas.

Respecto al **contenido de aire** en el sustrato, y a la permeabilidad y el control del flujo de agua, estos se deben estudiar también teniendo en cuenta las características e influencias de la capa drenante. El tamaño de partículas que se ha indicado previamente puede modificar las propiedades de ventilación y características del flujo de agua, evitando sobrecargas o pesos excesivos en la cubierta<sup>118</sup>. Partículas de mayor tamaño aumentan la porosidad y la conductividad hidráulica, mientras que las partículas de menor tamaño y de origen orgánico reducen las cantidades de aire y corriente de agua, acumulando mayor cantidad de agua y, por lo tanto, peso<sup>119</sup>. En cualquier caso, en un sustrato que se encuentre a máxima capacidad de almacenamiento de agua, el contenido de aire debe ser mayor o igual al 10 % del volumen<sup>120</sup>.

La capacidad de contener agua (**WHC**) del sustrato es esencial para el desarrollo de la vegetación, el retraso de la liberación del agua de lluvia y la minimización del volumen de escorrentía<sup>121</sup>. Diferentes investigaciones han determinado que el contenido de humedad capaz de almacenarse en el sustrato es más influyente en la supervivencia de la vegetación que el espesor de esta capa<sup>122</sup>. Cuando el sustrato esté lleno de agua, la cantidad de aire presente en los poros no debe ser menor al 10 % para permitir la aireación de las raíces, mientras que el valor máximo de WHC del sustrato se debe determinar de acuerdo con la tabla 4.7, observando que debe ser en cualquier caso mayor que el 20 % y menor que el 65 % de su volumen, para evitar encharcamientos<sup>123</sup>.

ALMACENAMIENTO DE AGUA (%)					
Cubierta intensiva excepto césped		Cubierta intensiva con césped		Cubierta extensiva	
Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas
≥ 30	≥ 45	≥ 30	≥ 35	≥ 20	≥ 35
≤ 65	≤ 65	≤ 65	≤ 65	≤ 65	≤ 65

Tabla 4.7. WHC del sustrato (% en volumen).

También se debe controlar el WHC respecto al peso de la cubierta, por ejemplo, en zonas con muchas precipitaciones se recomienda el uso de un material poroso, como la piedra pómez, porque drena con facilidad y es ligero, ya que la humedad que pueda quedar acumulada ya va a implicar por sí misma un suficiente aumento del peso de la cubierta<sup>124</sup>. Otra posible alternativa para retener una adecuada cantidad de agua y no aumentar considerablemente el peso de la cubierta puede ser la introducción de fibras de fieltro (textil) y viscosa (material sintético) en el sustrato, como hacen Serra *et al.*<sup>125</sup> en sus experimentos con sistemas de muros ajardinados (VGMS, *Vertical Greenery Module System*). En cuanto a la **permeabilidad** al agua del sustrato una instalado en la cubierta y compactado, los valores deberían estar comprendidos entre los mínimos y máximos establecidos en la tabla 4.8<sup>126</sup>.

118 Cascone, S. 2019.

119 Ibídem.

120 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

121 Cascone, S. 2019.

122 Zhang, H., Fan, X., Ren, L., *et al.* 2021; Zhang, H., Lu, S., Fan, X., *et al.* 2021.

123 FLL. 2018.

124 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

125 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017.

126 FLL. 2018.



PERMEABILIDAD AL AGUA (mm/min)					
Cubierta intensiva excepto césped		Cubierta intensiva con césped		Cubierta extensiva	
Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas	Una capa	Varias capas
60 - 400	0,3 - 30	60 - 200	0,6 - 70	60 - 400	0,6 - 70

Tabla 4.8. Permeabilidad al agua del sustrato (en mm/min).

En términos generales, estos valores de permeabilidad y WHC se pueden garantizar con valores de porosidad del sustrato mayores al 58 % y el 48 % para cubiertas extensivas e intensivas, respectivamente. Aunque ciertos estudios aportan más influencia en la retención de agua a la vegetación que a la profundidad o porosidad del sustrato<sup>127</sup>. La WHC del sustrato también se puede mejorar aumentando el volumen, la profundidad y el contenido de materia orgánica<sup>128</sup>. Estudios recientes analizan el uso de aditivos para mejorar el WHC, en lugar de aumentar el contenido de materia orgánica, como por ejemplo Farrell *et al.*<sup>129</sup>, que añadieron, por separado, silicatos en grano e hidrogel para mejorar el WHC y el PAW (del inglés *Plant Available Water*) de dos sustratos diferentes cuyos componentes inorgánicos eran escoria y tejas de terracota rotas. Ambos sustratos tenían valores iniciales similares de WHC (40-43 %), mejorando el WHC de ambos sustratos con el uso de silicatos, mientras que el uso de hidrogel solo mejoró el WHC del sustrato de escoria.

Respecto a las características de sorción y mejora de la calidad del agua de escorrentía por parte del sustrato, esta capacidad aumenta con el contenido de materia orgánica<sup>130</sup>, ya que un sustrato poroso con poco peso suele mostrar una alta concentración de minerales<sup>131</sup>. Aun así, Jang *et al.*<sup>132</sup> determinaron que el *mulch* (recubrimiento, orgánico o inorgánico, de la capa de sustrato para proteger semillas, reducir pérdidas de agua por evaporación, disminuir la erosión debido al impacto de las gotas de lluvia, etc.<sup>133</sup>) que emplearon en sus experimentos era capaz de absorber 72,5, 22,8 y 12,2 mg/g de plomo, cobre y zinc, mientras que Vijayaraghavan y Joshi<sup>134</sup> subrayaron en sus estudios que un sustrato compuesto en un 20 % de *coco-peat* (cáscara de coco) podía filtrar unos 6000 mm de lluvia sin exceder las regulaciones USEPA (del inglés *United States Environmental Protection Agency*) para ningún metal.

Por otro lado, Vijayaraghavan y Raja<sup>135</sup> estudiaron la composición de un sustrato mezclado, confirmando que una combinación de un 30 % de perlita, 20 % de vermiculita, 20 % de ladrillo roto, 10 % de arena y 20 % de *coco-peat* (componente orgánico) mostraba poca densidad (431 kg/m<sup>3</sup>), altos valores de WHC (39,4 %), una adecuada cantidad de poros llenos de aire en condiciones de saturación (19,5 %), una conductividad hidráulica elevada (4570 mm/h) y una gran capacidad de sorción, especialmente respecto a iones de metales (Al, Fe, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn y Cd) para los cuales mostraba una extracción mejor que un 97 %.

En cuanto al aporte de **nutrientes**, los sustratos compuestos de materiales granulados e inertes no aportan muchos nutrientes a las plantas<sup>136</sup>, aunque la cantidad de nutrientes se debería mantener lo más baja posible, de acuerdo con la guía de la FLL<sup>137</sup>. La adición de nutrientes suplementarios se debe realizar empleando fertilizantes adecuados (véase apartado 3.1.1.5), siempre de acuerdo con un estudio previo para conocer si la cubierta necesitará aporte de nutrientes durante las fases de mantenimiento, y recomendando el uso de fertilizantes CRF (de baja liberación)<sup>138</sup>.

127 Cascone, S. 2019.

128 Cascone, S. 2019; Vijayaraghavan, K. 2016.

129 Farrell, C., Ang, X.Q., Rayner, J.P. 2013.

130 Vijayaraghavan, K. 2016.

131 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

132 Jang, A., Seo, Y., Bishop, P.L. 2005.

133 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

134 Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M. 2014.

135 Vijayaraghavan, K., Raja, F.D. 2014.

136 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

137 FLL. 2018.

138 *Ibidem*.



Otra característica que destacar del sustrato es que, sea cual sea la combinación de materiales empleados, sería recomendable que fuera de **disponibilidad local**, ayudando también a disminuir su energía incorporada debido al transporte, a la vez que permite reducir el coste de instalación, especialmente si se emplean materiales reutilizados de la construcción, como ladrillos rotos<sup>139</sup>. El empleo de tierra natural local puede conllevar ciertas desventajas, como una retención pobre de agua, un aumento de peso, el desarrollo excesivo de malas hierbas locales, la falta de nutrientes y que se puede volver rígida<sup>140</sup>.

El origen del sustrato va a determinar también el valor del pH, considerándose adecuados unos valores neutros a ligeramente ácidos, situado entre 6,0 y 8,5. En función de la procedencia se puede aceptar un sustrato con pH ligero o moderadamente básico, pero no se recomienda que se excedan el límite de 8,5<sup>141</sup>.

Por otro lado, hay que destacar el papel principal del sustrato como soporte para la vegetación, por lo que debe favorecer su correcto crecimiento, desarrollo, estabilidad y anclaje. Respecto a la estabilidad de la vegetación, se debería estudiar con especial cuidado los compuestos inorgánicos, ya que, por ejemplo, la perlita flota fácilmente en el agua y las lluvias intensas la empujan hacia la superficie, donde una vez seca es más fácilmente arrastrable por el viento, debido a su poco peso, contaminando el aire<sup>142</sup>. Pero en el extremo opuesto, también se debe evitar un sustrato realizado en un 100 % de compost o materia orgánica, ya que no asegura el correcto anclaje de la vegetación y promueve el crecimiento de las malas hierbas<sup>143</sup>.

Se debe considerar que el sustrato, juntamente con la capa drenante y la lámina filtrante, conforman la **capa de enraizamiento** de la vegetación, capaz de aportar la estabilidad mencionada, por lo que su espesor debe ser el adecuada para que la vegetación pueda crecer y desarrollar su biomasa enterrada y aérea sin ningún tipo de problema<sup>144</sup> (Tabla 4.9). Existen dos tipos de cubiertas ajardinadas en función de su capa de enraizamiento: sistema multicapa y de una sola capa<sup>145</sup>. En la solución multicapa la capa de enraizamiento consta de sustrato, capa filtrante y capa drenante, todas diferenciadas entre sí. En el segundo caso, todo se engloba en una única capa: el sustrato hace sus veces de drenante y filtrante, desapareciendo estas dos capas como elementos independientes. En el sistema multicapa las raíces pueden ampliar su espacio colonizando la capa drenante, mejorando así también el acceso directo al agua almacenada.

En aquellos casos en los que se combinen diferentes especies vegetales serán necesarios diferentes espesores de la capa de enraizamiento, y, por lo tanto, diferentes espesores de sustrato. El caso más sencillo con un espesor homogéneo y regular, cumpliendo con las necesidades más restrictivas, puede aumentar la carga indeseable e innecesariamente, por lo que se recomienda optimizar los recursos y hacer un diseño en función de las necesidades de las especies vegetales, por ejemplo, con abombamientos puntuales del terreno, recintos con mayor espesor de sustrato o desniveles en el elemento estructural de soporte<sup>146</sup>.

Por último, también hay que mencionar que el sustrato aumenta la resistencia térmica de la cubierta, aunque esta aportación depende de la cantidad de agua (que influye en la conductividad térmica), por lo que no se considera un material aislante por sí mismo<sup>147</sup>. Un sustrato de menor espesor podrá acumular menor humedad, y por lo tanto retendrá menor calor y su aporte al enfriamiento de la cubierta será menor<sup>148</sup>. Getter *et al.*<sup>149</sup> hallaron en sus investigaciones que en sustrato de 4 cm el contenido de humedad era menor que en sustratos de 7 cm, mientras que la diferencia en el contenido de humedad entre espesores de 7 cm y 10 cm era prácticamente inexistente. Justamente debido a estas modificaciones del comportamiento aislante del sustrato no se recomienda la supresión de la capa de material aislante en una cubierta

139 Vijayaraghavan, K. 2016.

140 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

141 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

142 Vijayaraghavan, K. 2016.

143 *Ibidem*.

144 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

145 *Ibidem*.

146 *Ibidem*.

147 Cascone, S. 2019.

148 Getter, K.L., Rowe, D.B., Cregg, B.M. 2009; MacIvor, J.S., Lundholm, J. 2011.

149 Getter, K.L., Rowe, D.B., Cregg, B.M. 2009.



TIPO DE CUBIERTA AJARDINADA	ESPESOR DE SUBSTRATO (cm)*				
	6	8	10	12	15
<b>Grupos de plantas</b>					
<b>CUBIERTA EXTENSIVA</b>					
Suculentas	<				
Suculentas-Herbáceas perennifolias					
Suculentas - Herbáceas perennifolias - Cespitosas					
Suculentas - Herbáceas perennifolias - Vivaces					
<b>CUBIERTA SEMIINTENSIVA</b>					
Herbáceas perennifolias – Cespitosas - Vivaces					
Subarbustivas					
Arbustivas					
<b>CUBIERTA INTENSIVA</b>					
Cespitosas					
Subarbustivas					
Arbustivas de porte mediano (1-3 m)					
Arbustivas de porte grande (>3 m)					
Arbustivas de porte grande y coníferas de porte pequeño (<6 m)					
Árboles y coníferas de porte mediano (6-15 m)					
Árboles y coníferas de porte grande (>15 m)					

\* Las condiciones climáticas locales específicas, que pueden variar considerablemente en cada caso, requieren una capa de sustrato más o menos gruesa dentro del intervalo descrito.

Tabla 4.9. Espesor de la capa de sustrato (cm) en función de la especie vegetal.

ajardinada, aunque el espesor de sustrato empleado cumpla los requisitos térmicos establecidos en la normativa vigente.

#### 4.1.9.1 Sustrato en cubiertas extensivas

El principal problema en las cubiertas extensivas es encontrar la perfecta combinación que limite el peso y aporte la suficiente capacidad de contener humedad para que la vegetación se desarrolle correctamente, ya que el factor más limitante en el crecimiento de la vegetación en estas cubiertas es la sequía y la dependencia de las precipitaciones, si no se instalan sistemas de riego<sup>150</sup>.

Habitualmente, en cubiertas extensivas el sustrato se suele componer en un 75-90 % de materiales ligeros y en un 10-25 % de material orgánico<sup>151</sup>. Este compuesto de tierra vegetal o material orgánico suele aportar suficientes nutrientes durante el primer año, pero en épocas sucesivas será necesario emplear fertilizantes para renovar el contenido de nutrientes<sup>152</sup>. En este caso se añade compost, muy recomendable por su alta cantidad de nutrientes, población microbiana y capacidad de reciclaje, siendo necesario un estudio meticuloso de cuándo y cuanta cantidad de nutrientes necesita la cubierta en función de la época de crecimiento de la vegetación, para no producir un exceso de nutrientes que pudiera contaminar el agua de escorrentía de lluvia (especialmente con nitrógeno y fósforo, como se indica en el apartado 3.1.1.5)<sup>153</sup>. Una posible solución en el caso de producirse un exceso de nutrientes es captar su vertido y reciclarlos de vuelta al sistema de riego o fertilización, llegando de nuevo al sustrato y la vegetación<sup>154</sup>.

150 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

151 Ibídem.

152 Ibídem.

153 Ibídem.

154 Ibídem.





ESPESOR DE SUBSTRATO (cm)*															
18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150	200
				>											
							>								
													>		
				>											
							>								
							>								
									>						
														>	
															>

En todas las cubiertas ajardinadas, pero especialmente en las cubiertas extensivas, la descomposición biológica y la compactación de las capas del sustrato también suponen un problema, debiendo ser mínimas al tiempo que los componentes minerales no deberían dispersarse (suponiendo un peligro estructural para el sustrato)<sup>155</sup>. Asimismo, en sustratos de poco espesor, se debe controlar la erosión de la superficie debido al viento o a pendientes pronunciadas, siendo recomendable utilizar mantas de protección (Figura 4.25) y/o conseguir una cobertura total con la vegetación<sup>156</sup>.



Figura 4.25. Control de la erosión superficial mediante el uso de malla de coco (dcha.).

155 García, P.V. 2016.  
 156 Ibídem.



Algunos posibles materiales adecuados para sustratos de cubiertas extensivas y sus propiedades, de acuerdo con el estudio realizado por Valera, son los siguientes<sup>157</sup>:

- Ladrillo triturado. Se trata de un material que aporta una buena retención de humedad con una granulometría entre 0,5 y 2 cm, mientras que en el caso de partículas más pequeñas aparecen problemas de falta de porosidad. Se debe destacar que es un material que tiende a degradarse físicamente y se debe controlar su origen y el contenido de elementos calcáreos o de cemento.
- Arena. Las ventajas de este material es su suministro fácil y económico, el menor desarrollo de malas hierbas y la buena conservación. Aun así, se debe evitar el contenido de arcillas, puede presentar problemas de deficiencia de fósforo, ya que la arena no lo retiene, y puede generar grandes variaciones en la humedad del sustrato y en las concentraciones de sales.
- *Coco-peat*. Con este elemento se consigue un equilibrio óptimo entre retención de agua y cantidad de aireación de las raíces, además de poseer un rango de pH entre 5,5 y 6,2, adecuado para la mayoría de la vegetación. Su capacidad para ceder y absorber calor con rapidez facilita el desarrollo de raíces tanto en épocas cálidas como frías, además de ser capaz de retener nutrientes y liberarlos progresivamente, evitando pérdidas por lixiviación (Figura 4.26).



Figura 4.26. *Coco-peat para su uso en sustratos de cubiertas ajardinadas extensivas.*

#### 4.1.10 Capa separadora

Se trata de fieltros o láminas, de distinta composición según la función que desempeñen (Tabla 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13), que se intercalan entre las diferentes capas de la cubierta para evitar circunstancias de riesgo, como el punzonamiento o la incompatibilidad química<sup>158</sup> (Figura 4.27). En todos los casos las capas separadoras empleadas deberán ser imputrescibles y compatibles con los materiales que vayan a proteger<sup>159</sup>.

En el caso de la tabla 4.13, se especifican también el resto de capas desde el sustrato hasta la lámina impermeable, en función de que la cubierta ajardinada sea extensiva, semiintensiva o intensiva. Tal como se refleja en la tabla, las cubiertas ajardinadas extensivas se instalan únicamente con capa drenante de paneles nodulares<sup>160</sup>, mientras que las cubiertas semiintensivas e intensivas se pueden diseñar con una capa drenante de materiales granulares o paneles nodulares. La intención de que la cubierta extensiva sea ligera implica el uso de materiales que aporten poco peso al sistema, pero desarrollando correctamente sus funciones. Este es el caso de los paneles nodulares, cuyo almacenamiento de agua es adecuado y suficiente,

157 García, P.V. 2016.

158 Paradela, M.L.S. 2020a.

159 *Ibidem*.

160 AENOR. 2013a.



cumpliendo con los requisitos establecidos (véase apartado 4.1.7), pero con poco peso propio. Además, el espesor de la capa de sustrato de una cubierta extensiva no presenta un excesivo peso propio, por lo que los paneles presentan una suficiente resistencia a compresión. En cambio, en otros casos, sobre todo en cubiertas intensivas con grandes espesores de sustrato, es necesario disponer una capa de materiales granulares o combinar los paneles nodulares con materiales granulares para aumentar su resistencia a compresión (véase apartado 4.1.7).

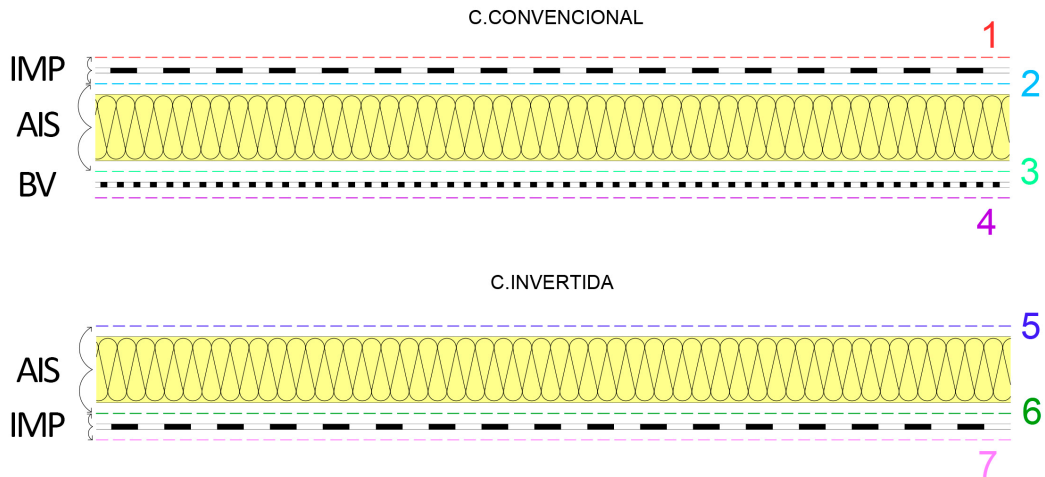


Figura 4.27. Tipos de capas separadoras de acuerdo con su ubicación respecto a la lámina impermeable (IMP), el material aislante (AIS) y la barrera de vapor (BV).

CAPA SEPARADORA	FUNCIÓN	ANOTACIONES
<b>CS-1</b>	Antipunzonante	- Pavimento fijo - Pavimento flotante - Grava o capa drenante de áridos sueltos (cubierta ajardinada) - Aumentar resistencia a punzonamiento de la IMP
	Antiadherente	- Pavimento fijo - Grava
	Filtrante	- Grava, si la IMP es de EPDM - Cubierta ajardinada extensiva - Proteger frente a los finos de la lechada*
	Difusora de vapor	- Pavimento fijo, recibido con mortero de cemento
	Incompatibilidad química	- Grava, si la IMP es de EPDM - Capa drenante, panel nodular (cubierta ajardinada)
	Retenedora de humedad	- Cubierta ajardinada extensiva o intensiva, según necesidades del diseño
	Antiraíces (véase apartado 4.1.6)	- Si la IMP no es antiraíces (cubierta ajardinada)
<b>CS-2</b>	Antipunzonante	
	Antiadherente	- IMP con sistema no adherido o fijado mecánicamente
	Incompatibilidad química	- Contacto PVC con material bituminoso - IMP EPDM - Contacto con AIS de PUR o XPS



CS-3	Antipunzonante	- AIS rígido: vidrio celular o árido abrasivo
	Antiadherente	- Contacto BV bituminosa con AIS XPS/EPS/PUR
	Difusora de vapor	
CS-4	Incompatibilidad química	- Contacto BV PVC con AIS XPS/EPS/PUR - Contacto BV bituminosa con AIS XPS/EPS/PUR
	Antipunzonante	- BV sintética
	Antiadherente	- BV bituminosa
CS-5	Incompatibilidad química	- BV no resistente al betún
	Antipunzonante	- Pavimento fijo - Pavimento flotante - Grava o capa drenante de áridos sueltos (cubierta ajardinada)
	Antiadherente	- Pavimento fijo - Grava
	Filtrante	- Grava - Proteger frente a los finos de la lechada* - Cubierta ajardinada extensiva
	Difusora de vapor	- Pavimento fijo - Cubierta ajardinada
	Incompatibilidad química	- Capa drenante, panel nodular (cubierta ajardinada)
	Permitir el libre movimiento y la funcionalidad de las juntas del AIS	- Pavimento fijo
CS-6	Retenedora de humedad	- Cubierta ajardinada extensiva o intensiva, según necesidades del diseño
	Antiadherente	- Contacto con AIS de XPS o EPS
	Incompatibilidad química	- Contacto PVC con AIS XPS/EPS/PUR - IMP EPDM
CS-7	Antiraíces (véase apartado 4.1.6)	- Si la IMP no es antiraíces (cubierta ajardinada)
	Antipunzonante	
	Antiadherente	- IMP con sistema no adherido o fijado mecánicamente
CS-7	Incompatibilidad química	- Contacto PVC con material bituminoso - IMP EPDM

\* Con pavimento fijo, para evitar que la lechada de mortero impregne y endurezca el fieltro situado bajo ella, se colocará una lámina de plástico sobre las capas separadoras CS-1 y CS-5.

Tabla 4.10. Designación y función de los diferentes tipos de capas separadoras.

Como se ha observado en la tabla 4.10, las funciones de las capas separadoras son diversas. A continuación, se describen brevemente las principales funciones:

- **Capa separadora antipunzonante.** Se coloca cuando existe riesgo de incompatibilidad física, para proteger de daños mecánicos especialmente a la lámina impermeable y el aislamiento térmico<sup>161</sup>.

Principalmente se emplea, en cubiertas invertidas, entre la impermeabilización no adherida o fijada mecánicamente y la formación de pendientes o el mortero de regulación. En este caso se recomienda

161 Cascone, S. 2019.



el uso de fieltros sintéticos con resistencia al punzonamiento estático igual o mayor a 400, 500 o 600 kg. Otra posición de esta capa antipunzonante es entre el aislante térmico y la protección pesada (grava, pavimento fijo, pavimento flotante, etc.). Para este caso se emplea un fieltro sintético combinado con otra capa de características filtrantes, en el caso de que el acabado sea de grava, o con función antiadherente para que el mortero u hormigón en contacto con él no impregne y rigidice la capa antipunzonante<sup>162</sup>.

En el caso de cubiertas convencionales, se dispone una capa antipunzonante entre la lámina impermeable y la protección pesada. Esta capa tendrá una resistencia a punzonamiento estático igual o mayor a 50 kg sin perforarse, cuando la base de la impermeabilización sea flexible, y mayor a 400 kg cuando la base sea rígida. Al igual que en el caso de las cubiertas invertidas, cuando la protección pesada vaya colocada con mortero u hormigón se deberá intercalar una capa antiadherente<sup>163</sup>. Además, también se debe proteger del punzonamiento a la barrera de vapor. Se disponen fieltros sintéticos entre esta y la formación de pendientes o el mortero de regulación, al igual que en el caso de las láminas impermeables en cubiertas invertidas. También se plantea el uso de capas antipunzonantes sobre la barrera de vapor en aquellos casos en los que el aislante se disponga en formato de paneles rígidos de vidrio celular o se componga de áridos abrasivos.

- **Capa separadora antiadherente.** Se emplea para desolidarizar o evitar que dos elementos de la cubierta se adhieran, incluido el sistema de impermeabilización en función del sistema de colocación empleado<sup>164</sup>. Se suelen disponer en cubiertas invertidas para proteger el aislante térmico cuando la protección pesada se coloca con mortero u hormigón. En cubiertas convencionales se coloca debajo de la barrera de vapor para desolidarizarla del soporte (estructura, formación de pendientes o mortero de regularización) y, por encima, para desolidarizar barrera de vapor y aislante térmico. En estas mismas cubiertas convencionales, también se emplea para evitar la adherencia de aislante y lámina impermeable cuando está va no adherida o fijada mecánicamente y para proteger a la lámina impermeable cuando la protección pesada va colocada con mortero u hormigón. En este caso, las capas más empleadas son fieltros de fibra de vidrio compactos, fieltros sintéticos compactos o láminas de plástico<sup>165</sup>.
- **Capa separadora por incompatibilidad química.** En aquellos casos que sea necesario evitar el contacto entre elementos químicamente incompatibles<sup>166</sup>, como por ejemplo entre barreras de vapor no resistentes al betún y láminas impermeables de betún modificado. Las capas más empleadas son las mismas que en el caso de capas antiadherentes, ya que en muchos casos se emplean en las mismas circunstancias y posiciones (Figura 4.28).



Figura 4.28. Capa separadora antiadherente y por incompatibilidad química, realizada con polipropileno (PP).

162 AENOR. 2009.

163 AENOR. 2009.

164 Cascone, S. 2019.

165 AENOR. 2009.

166 Cascone, S. 2019.



C.S.	FUNCIÓN	
CS-1	Antipunzonante	- Protección pesada con mortero de agarre u hormigón
		- Pavimento flotante
		- Grava ( <i>IMP</i> EPDM)
		- Aumentar resistencia <i>IMP</i>
	Antiadherente	- Resto de casos
		- Grava ( <i>IMP</i> EPDM)
	Filtrante	- Grava ( <i>IMP</i> EPDM)
- Cubierta ajardinada extensiva <sup>2</sup>		
Difusora de vapor		
Incompatibilidad química	- Grava ( <i>IMP</i> EPDM)	
	- Capa drenante, panel nodular (cubierta ajardinada) <sup>2</sup>	
Retenedora de humedad	- Cubierta ajardinada <sup>2</sup>	
Antiraíces		
CS-2	Antipunzonante	
	Antiadherente	
	Incompatibilidad química	- Contacto PVC con material bituminoso
- Contacto con <i>AIS</i> de PUR o XPS		
CS-3	Antipunzonante	- <i>AIS</i> rígido: vidrio celular o árido abrasivo
	Antiadherente	- Contacto <i>BV</i> bituminosa con <i>AIS</i> XPS/EPS/PUR
	Difusora de vapor	
	Incompatibilidad química	- Resto de casos
- Contacto <i>BV</i> bituminosa con <i>AIS</i> XPS/EPS/PUR		



<b>MATERIALIDAD</b>			
<i>Técnicas de construcción convencionales y avanzadas: fachadas y cubiertas</i>	<i>CTE DB-HS Borrador 2003</i>	<i>UNE 104416:2009</i>	<i>Catálogo comercial</i>
		FS 400 B + LP 120 FS 400 B + FS 1/250 <sup>1</sup>	
	2 cm mortero		
P 400			
P 200	Filtro no tejido (NO usar P/FV)	FS 400 B FS 50 A	
P 200	P FV PP PE		
P 400			
P 400		FS 15	
PP+PE 160			P+PP 470
P 400			
	PP 80 PE		PP 80/100
PP+PE 160			P+PP 470/850
			PE 320
		FS 400/500/600 B	
P 120/160 FV 110	P FV PP		
PP 200 PP+PE 125	P FV PP 2 cm mortero	FS 1/250 FFV 1/120	
		FS 1/250 FFV 1/120	
		FS 400 B	
		FS 1/250 FFV 1/120 LP 120	
		LP 120+FFV 1/120 LP 120+FS 1/250	
PP 90	P FV PP 2 cm mortero	FS 1/250 FFV 1/120	
		FS 1/250 FFV 1/120	



	<b>Antipunzonante</b>	
	<b>Antiadherente</b>	
	<b>Incompatibilidad química</b>	
<b>CS-5</b>	<b>Antipunzonante</b>	- Protección pesada con mortero de agarre u hormigón
		- Grava
		- Capa drenante de áridos sueltos (cubierta ajardinada) <sup>2</sup>
	<b>Antiadherente</b>	
	<b>Filtrante</b>	- Grava
		- Proteger frente a los finos de la lechada <sup>1</sup>
	<b>Difusora de vapor</b>	- Cubierta ajardinada <sup>2</sup>
	<b>Incompatibilidad química</b>	- Capa drenante, panel nodular (cubierta ajardinada) <sup>2</sup>
<b>Libre movimiento y funcionalidad juntas del AIS</b>		
<b>Retenedora de humedad</b>	- Cubierta ajardinada <sup>2</sup>	
<b>CS-6</b>	<b>Antiadherente</b>	
	<b>Incompatibilidad química</b>	
	<b>Antiraíces</b>	
<b>CS-7</b>	<b>Antipunzonante</b>	
	<b>Antiadherente</b>	
	<b>Incompatibilidad química</b>	- Contacto PVC con material bituminoso

<sup>1</sup> Con pavimento fijo, para evitar que la lechada de mortero impregne y endurezca el fieltro situado bajo ella, se colocará una lámina de plástico sobre las capas separadoras CS-1 y CS-5.

<sup>2</sup> Particularidades de las capas CS-1 y CS-5 en cubiertas ajardinadas en tabla 4.13.

Tabla 4.11. Productos de las diferentes capas separadoras.





		FS 400/500/600 B	
		FS 1/250 FFV 1/120 (con BV soldada solo esta) LP 1/120	
		FS 1/250 FFV 1/120	
P 200		FS 30 A + LP 120 FS 30 A + FS 1/250 <sup>1</sup>	
	Fieltro no tejido	FS 30 A + FS 15 (con esta combinación también es filtrante)	
		FS 50 A (soporte base flexible) FS 400 B (soporte base rígido)	
	FS filtrante	FS 15	
		FS 20 A + LP 120 FS 20 A + FS 1/250	
PP PE PP+PE			PP 80/100
	PP 80 PE		PP 80/100
		P	
PP+PE 160			P+PP 470/850
		FS 1/250 FFV 1/120	
PP 90	P FV PP 2 cm mortero		
			PE 320
		FS 400/500/600 B	
P 120/160 FV 110	P FV PP		
PP 200 PP+PE 125	P FV PP 2 cm mortero	FS 1/250 FFV 1/120	



DESIGNACIÓN*	COMPOSICIÓN
P 120/160/200/400	Filtro de poliéster no tejido con masa igual o mayor a 120, 160, 200 o 400 gr/m <sup>2</sup> .
PP 80/90/100/200	Filtro de polipropileno no tejido con masa igual o mayor a 80, 90, 100 o 200 gr/m <sup>2</sup> .
PE 320	Filtro de polietileno con masa igual o mayor a 320 gr/m <sup>2</sup> .
P+PP 470/850	Manta retenedora de poliéster y polipropileno con masa igual o mayor a 470 o 850 gr/m <sup>2</sup> .
PP+PE 125/160	Filtro de polipropileno (70%) y polietileno (30%) no tejido con masa igual o mayor a 125 o 160 gr/m <sup>2</sup> .
FFV 110	Filtro de fibra vidrio no tejido con masa igual o mayor a 110 gr/m <sup>2</sup> .
FFV 1/120	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa igual o mayor a 120 gr/m <sup>2</sup> .
FS 20/30/50 A	Filtro sintético con resistencia a punzonamiento estático mayor a 20, 30 o 50 kg, ensayado junto a <i>IMP</i> o <i>BV</i> de acuerdo con el método A descrito en la norma UNE 104416:2009.
FS 400/500/600 B	Filtro sintético con resistencia a punzonamiento estático mayor a 400, 500 o 600 kg, ensayado junto a <i>IMP</i> o <i>BV</i> de acuerdo con el método B descrito en la norma UNE 104416:2009.
FS 1/250	Filtro sintético compacto con masa igual o mayor a 250 gr/m <sup>2</sup> .
FS 15	Filtro sintético con permeabilidad perpendicular al plano mayor que 15 mm/s.
LP 120	Lámina de plástico con masa igual o mayor a 120 gr/m <sup>2</sup> .

\* En caso de que no se haya especificado la masa o características particulares del filtro o lámina, tan solo se indican las siglas del producto.

Tabla 4.12. Composición de los productos empleados para las diferentes capas separadoras.

SISTEMA DE CAPAS EN CUBIERTAS AJARDINADAS
Substrato de cubierta ajardinada extensiva (e < 15 cm)
Lámina filtrante (PP 100 o FS 15)
Capa drenante, paneles nodulares (PE)
<b>CS-1</b> Capa separadora filtrante, retenedora de humedad y de incompatibilidad química (P+PP 470)
Aislante térmico
Lámina antiraíces (PE 320) + Lámina impermeable

Substrato de cubierta ajardinada semiintensiva o intensiva (e > 15 cm)
Lámina filtrante (PP 100 o FS 15)
Capa drenante, paneles nodulares (PE)
<b>CS-5</b> Capa separadora difusora de vapor y de incompatibilidad química (PP 80/100) *
Aislante térmico
Lámina antiraíces (PE 320) + Lámina impermeable



Substrato de cubierta ajardinada semiintensiva o intensiva (e > 15 cm)
Lámina filtrante (PP 100 o FS 15)
Capa drenante, áridos sueltos (Ø 10 mm)
<b>CS-5</b> Capa separadora difusora de vapor y antipunzonante (FS 50 A o FS 400 B) *
Aislante térmico
Lámina antiraíces (PE 320) + Lámina impermeable

Substrato de cubierta ajardinada extensiva (e < 15 cm)
Lámina filtrante (PP 100 o FS 15)
Capa drenante, paneles nodulares (PE)
<b>CS-5</b> Capa separadora difusora de vapor, filtrante y retenedora de humedad (P+PP 470)
Aislante térmico
Lámina antiraíces (PE 320) + Lámina impermeable

\* De acuerdo con especificaciones de diseño de la cubierta, también se pueden disponer capas separadoras retenedoras de humedad en cubiertas ajardinadas semiintensivas e intensivas.

Tabla 4.13. Particularidades de las capas separadoras CS-1 y CS-5 en cubiertas ajardinadas.

#### 4.1.11 Vegetación

La vegetación que se instala en las cubiertas ajardinadas tiene como propósito principal desarrollar el máximo nivel de cobertura posible para conseguir el mejor comportamiento térmico y energético de la cubierta, siendo en este caso más deseables las plantas tapizantes, frente a las plantas en forma de macolla (es decir, que nacen del mismo pie) o que crecen en grupos discontinuos<sup>167</sup>. De acuerdo con la guía de la FLL, al hablar de cobertura total se refiere a, al menos, alcanzar un 75 % antes de su uso<sup>168</sup>, y aquellas especies más recomendadas en este sentido, además de las tapizantes, son aquellas con una importante capacidad autorregenerativa, característica común en las plantas perennes<sup>169</sup>. Además, las especies perennes aseguran una superficie cubierta todo el año, mientras que se recomienda que las especies anuales se empleen solo como complemento de la vegetación perenne<sup>170</sup>. Igualmente, es deseable que la vegetación no posea demasiadas partes secas para no fomentar el desarrollo y la propagación de incendios<sup>171</sup>. Las plantas suculentas, base de la vegetación de las cubiertas extensivas, y principalmente constituidas por agua, reducen al mínimo el riesgo de incendios<sup>172</sup>. En el caso de cubiertas semiintensivas o intensivas, el sistema de riego también favorece la reducción de riesgo de incendios.

Otras funciones de la capa de vegetación son la caracterización del aspecto visual de la cubierta, la prevención de la erosión del substrato (mediante la protección de las salpicaduras directas de agua de lluvia, reduciendo la velocidad del viento en la superficie de la cubierta y reduciendo la velocidad de la escorrentía de agua en la superficie), la reducción del peso de la cubierta por facilitar la evaporación de agua del substrato y el aporte de un entorno protegido para el desarrollo de especies animales<sup>173</sup>. Cabe destacar que en los primeros meses tras la implantación esta no ha desarrollado suficiente cobertura como para aportar beneficios térmicos, acústicos, climáticos, físicos o estéticos a la cubierta, por lo que hasta que no se desarrolle adecuadamente la vegetación no se considera que la cubierta ajardinada esté consolidada<sup>174</sup>.

167 García, P.V. 2016.

168 FLL. 2018.

169 Britto, C. 2001.

170 Britto, C. 2001; Campo, C.G. 2004.

171 Campo, C.G. 2004.

172 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

173 Cascone, S. 2019; Jim, C.Y. 2017.

174 Britto, C. 2001.



En base a estas funciones, y teniendo en cuenta el sistema en el que se instala (intensivo, semiintensivo o extensivo), las características del sustrato (especialmente relacionado con el pH, la salinidad y el contenido de nutrientes) y las condiciones climáticas (intensidad de las lluvias, humedad, viento y radiación solar)<sup>175</sup>, la vegetación de una cubierta ajardinada deberá cumplir una cierta combinación de los siguientes requisitos que permita asegurar su desarrollo y crecimiento<sup>176</sup>:

- Resistencia para asegurar un desarrollo con escasos requerimientos de mantenimiento.
- Resistencia frente a largos periodos de sequía.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Resistencia a una elevada incidencia de la radiación solar.
- Resistencia a las heladas.
- Resistencia a la acumulación temporal de agua, encharcamientos puntuales.
- Resistencia a la acción del viento.
- Resistencia a la contaminación urbana.
- Persistencia durante largos periodos de tiempo.
- Crecimiento controlado.
- Cierta componente estético.
- Rápido crecimiento y desarrollo de cobertura.
- Con una agresividad radical baja.
- Peso bajo.
- Riesgo bajo de incendios.
- No ser alergógenas.
- Con capacidad autorregenerativa.

Cabe destacar que en diferentes investigaciones la adaptación al clima, especialmente a sus eventos extremos (sequías, temperaturas extremas, heladas, etc.), se muestra como el factor más determinante para la elección de una vegetación que evite la mortalidad a lo largo del tiempo<sup>177</sup>. Dentro de los factores climáticos que se pueden suponer limitantes en relación con la supervivencia de las especies vegetales se deben tener en cuenta no solo las temperaturas máximas o mínimas, sino también las fluctuaciones fuertes de temperaturas, ya que pueden producir mayor mortalidad que las temperaturas extremas por sí mismas<sup>178</sup>. Otros factores que considerar en la disposición y elección de la vegetación son las zonas de sombra de la cubierta, su orientación o la temperatura que puede alcanzar su superficie, entre otras<sup>179</sup>. Respecto a las características de la vegetación, aunque no se haya mencionado en el listado anterior, se desaconseja el uso de especies invasoras, de árboles de gran porte con riesgo de rotura, vegetación con raíces agresivas, plantas especialmente sensibles y aquellas con densidades foliares que presenten excesiva resistencia al viento, pudiendo este llegar a arrancarlas del sustrato<sup>180</sup>. Se recomienda, en el caso de emplear árboles, que tengan una densidad foliar ligera o media (menor resistencia al viento y menor riesgo de rotura)<sup>181</sup>.

De acuerdo con la NTJ-11C las variedades vegetales que se pueden emplear en cubiertas ajardinadas se agrupan en seis grupos, en función de su crecimiento, desarrollo y tipología<sup>182</sup> (Figura 4.29):

- **Vivaces (A).** Su follaje es caduco, pero poseen órganos de reserva subterráneos que les permite vivir en condiciones extremas. Son resistentes a las sequías, a bajas temperaturas, requieren poco aporte de nutrientes, son estéticamente agradables con una floración vistosa y son sensibles a los encharcamientos.

175 Cascone, S. 2019.

176 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; García, P.V. 2016.

177 Rayner, J.P., Farrell, C., Raynor, K.J., *et al.* 2016; Zhang, H., Fan, X., Ren, L., *et al.* 2021.

178 Zhang, H., Fan, X., Ren, L., *et al.* 2021.

179 Cascone, S. 2019.

180 Ajuntament de Barcelona. 2015; DANOSA España. 2014.

181 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

182 Cruz, A.I. 2017; Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.



- **Suculentas (B).** Acumulan grandes cantidades de agua en las hojas y tallos; tienen gran resistencia a la radiación y a las altas temperaturas; reducen la transpiración en casos de estrés térmico pudiendo sobrevivir a largos periodos de sequía (resistencia estomática); requieren poco aporte nutricional; se extienden rápidamente por el sustrato (tapizantes) y no resisten pisadas ni encharcamientos. El ejemplo más conocido y empleado son las especies *sedum*.
- **Herbáceas perennifolias y cespitosas (C).** Su parte aérea es perenne, poseen un aspecto tierno y son de porte bajo. Son capaces de colonizar con relativa rapidez espacios sin vegetación, requieren poco aporte nutricional y resisten temperaturas extremas. Dentro de este grupo destacan las familias de las gramíneas y las leguminosas.
- **Subarbustivas (D).** Son similares al próximo grupo, los arbustos, pero de altura inferior a 1 m en edad adulta y su parte aérea es perenne. Muestran una buena resistencia a la sequía, a las temperaturas extremas y requieren poco aporte nutricional.
- **Arbustivas (E).** Vegetación leñosa de entre 1 y 5 m de altura en edad adulta. En este caso la parte aérea puede ser perenne, caduca o semicaduca. Presentan alta resistencia a temperaturas extremas, al viento y requieren poco aporte nutricional.
- **Arbóreas (F).** Vegetación leñosa con un tronco predominante y con altura igual o superior a 5 m en edad adulta. Pueden ser de hoja perenne o caduca; coníferas, frondosas o palmeras. Presenta una alta resistencia a temperaturas extremas, requieren aporte nutricional, generan sombra y estéticamente son más atractivos. No se recomienda el empleo de árboles con sistema radical agresivo (como por ejemplo el bambú o las palmeras), de gran porte o con riesgo de rotura.

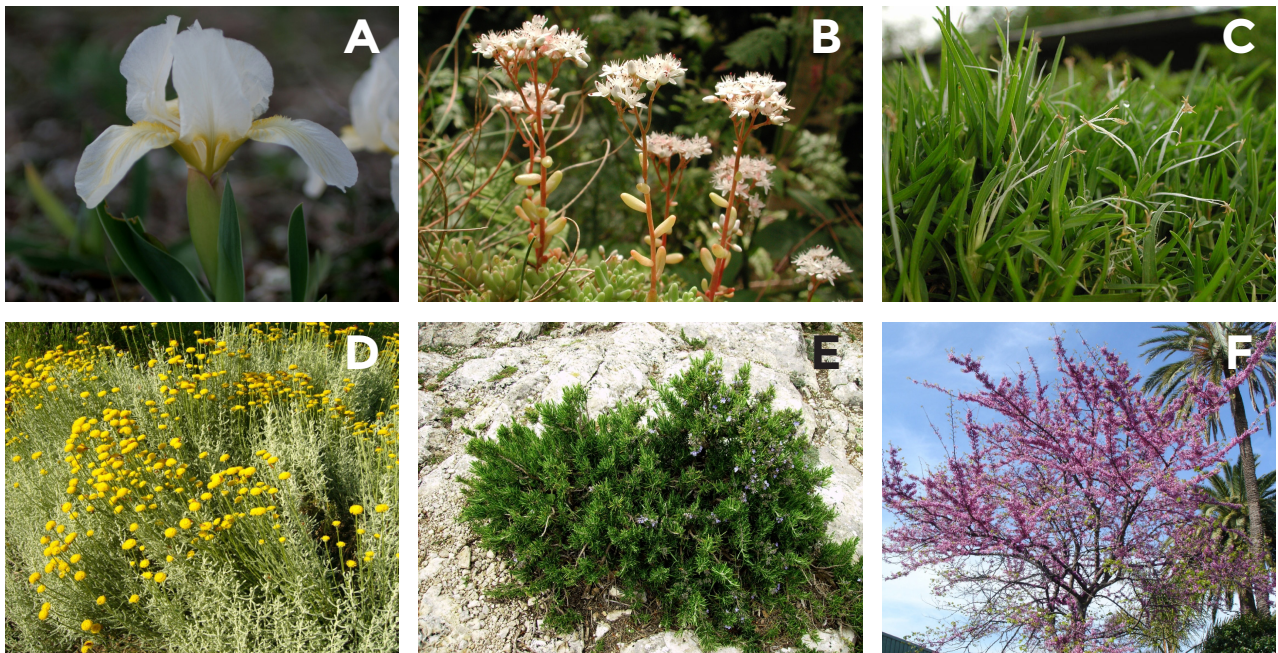


Figura 4.29. Variedades vegetales: *Iris lutescens*, vivacea (A); *Sedum album*, suculenta (B); *Pennisetum clandestinum*, herbácea perennifolia/cespitosa (C); *Santolina chamaecyparissus*, subarbustiva (D); *Rosmarinus officianilis*, arbustiva (E); *Cercis siliquastrum*, arbórea (F).

Esta clasificación se basa en las características generales y de uso de la vegetación, pero no se rige por criterios estrictamente biológicos. Algunas especies vegetales pueden pertenecer a varios grupos a la vez (por ejemplo, existen ciertas especies *sedum* suculentas que son perennes y otras que son vivaces)<sup>183</sup>.

Respecto al desarrollo de esta vegetación, debe mencionarse que las cubiertas ajardinadas no son un ambiente favorable para el crecimiento de ninguna especie o grupo<sup>184</sup>, principalmente porque la disponibilidad de agua fluctúa en función de los eventos lluviosos y se convierte en el factor limitante más importante para el correcto desarrollo de la vegetación<sup>185</sup>. Por ello, en climas secos y calurosos la cubierta se debe plantear

183 García, P.V. 2016.

184 Farrell, C., Mitchell, R.E., Szota, C., et al. 2012; Rowe, D.B. 2011.

185 Vijayaraghavan, K. 2016.



con especies que posean una elevada succulencia en las hojas (cantidad de agua útil en la propia vegetación para que esta desarrolle sus procesos metabólicos cuando el sustrato no posee suficiente humedad<sup>186</sup>) y un limitado uso de agua, combinado con el empleo de sustratos con una elevada capacidad de almacenamiento de agua. Farrell *et al.*<sup>187</sup> concluyeron en sus estudios una supervivencia media de 12 días más en condiciones de sequía en un sustrato con mejor WHC, y respecto a las especies vegetales, las *sedum* consumían toda el agua del sustrato en 36-71 días, mientras que otras especies, como *Carpobrotus modestus* y *Disphyma crassifolium*, consumían esta misma agua en 22-36 días. Esto se debía a que las especies *sedum* ajustan sus necesidades de agua y reducen su biomasa en condiciones de sequía, gracias a su succulencia.

También se debe tener en cuenta la tolerancia a la radiación solar directa, la capacidad de la vegetación de sobrevivir en estas condiciones y las posibles zonas en sombra de la cubierta<sup>188</sup>. En experiencias llevadas a cabo por Getter *et al.*<sup>189</sup> se observó un cambio de apariencia de las plantas en función de los niveles de radiación solar a los que estaban sometidas, mientras que la cobertura alcanzada no parecía mostrar diferencias significativas entre las zonas en sombra y las que no. Cuando la vegetación cierra sus estomas (los poros de la piel vegetal) para adaptarse a circunstancias de sequía y reducir la pérdida de agua por transpiración, reduce el enfriamiento por evapotranspiración y, debido a las intensas radiaciones solares incidentes, puede aumentar la temperatura de su superficie drásticamente (estrés térmico)<sup>190</sup>. Existen especies vegetales, como las suculentas, capaces de aumentar su resistencia estomática a niveles superiores, cerrando los estomas y evitando la pérdida de agua por evapotranspiración en momentos de estrés hídrico y falta de agua disponible. En este caso destaca la importancia del albedo de la vegetación, pudiendo mejorar así la reflectancia de la superficie y evitar un sobrecalentamiento, ya que, a mayor albedo, menor absorción de calor y temperatura de la superficie, a falta de perder el calor acumulado por evapotranspiración<sup>191</sup>. La reflectancia, en este caso, mejora con el aumento de la riqueza de especies (biodiversidad) y la cantidad de biomasa (a mayor biomasa, mayor reflectancia). A pesar de ello, no todas las combinaciones de especies funcionan bien, por lo que Lundholm *et al.*<sup>192</sup> recomendaron la combinación de suculentas, cespitosas y forbias altas (tipo de planta herbácea). En general, gran cantidad de autores confirman que el diseño con diversas especies vegetales es capaz de aumentar la biodiversidad a la vez que soporta un planeamiento más sostenible y mejora la calidad de la vida urbana<sup>193</sup>.

A la hora de escoger la vegetación más adecuada uno de los factores más importantes, y por el que no se pueden realizar generalizaciones de especies adecuadas, es la adaptación al clima, por lo que las especies locales son más recomendables al estar habituadas a las condiciones climáticas del entorno de la cubierta y ser fácilmente accesibles<sup>194</sup>. Respecto a la adaptabilidad de las especies vegetales a las condiciones de invierno de las diferentes zonas climáticas, el USDA (del inglés *Department of Agriculture for the United States*) desarrolló un mapa de zonas de rusticidad (*Hardiness Zone Maps*) y una clasificación de especies vegetales para los Estados Unidos, en función de la temperatura mínima absoluta anual, posteriormente adaptada a Europa, dividiéndola en 11 zonas<sup>195</sup>. Estas zonas adaptadas a la Península Ibérica, Baleares y Canarias se pueden consultar en la norma NTJ 11C<sup>196</sup>. El propósito de las zonas de rusticidad es identificar que vegetación puede soportar adecuadamente las temperaturas mínimas de cada zona, mejorando y adaptando la elección de la vegetación<sup>197</sup>.

186 Rayner, J.P., Farrell, C., Raynor, K.J., *et al.* 2016.

187 Farrell, C., Mitchell, R.E., Szota, C., *et al.* 2012.

188 Li, W.C., Yeung, K.K.A. 2014.

189 Getter, K.L., Rowe, D.B., Cregg, B.M. 2009.

190 Blanus, T., Monteiro, M.M.V., Fantozzi, F., *et al.* 2013.

191 Li, W.C., Yeung, K.K.A. 2014.

192 Lundholm, J., MacIvor, J.S., MacDougall, Z., *et al.* 2010.

193 Cascone, S. 2019.

194 Ministerio de la Vivienda. 1976; Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

195 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Gardenia. 2022.

196 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

197 Gardenia. 2022.



Al hacer una revisión de la literatura al respecto de las especies vegetales más apropiadas para la instalación en cubiertas ajardinadas, se plantea en varias ocasiones el uso de las especies *sedum* en las cubiertas, especialmente las extensivas, debido a sus buenas propiedades y resistencia a los efectos negativos de las cubiertas ajardinadas. Pero el *sedum* no es una planta autóctona en todas las partes del mundo, por lo que se hace necesario el desarrollo de investigaciones que se centren en buscar otras especies vegetales adecuadas, en función de la localización de la cubierta ajardinada<sup>198</sup> (Figura 4.30). Blanusa *et al.*<sup>199</sup> analizaron diferentes especies vegetales que pueden ser empleadas en las cubiertas ajardinadas, a parte del *sedum*. Entre ellas destacó la *Stachys byzantine*, cuyo funcionamiento era destacable en términos de enfriamiento de la superficie de las hojas, incluso con un substrato secos, consiguiendo 5 °C por debajo de las temperaturas del *sedum*. En cuanto al enfriamiento del aire del entorno, consiguió valores hasta 12 °C menores bajo la capa de vegetación, y hasta 1 °C menos en la capa de aire sobre la vegetación, en comparación con el *sedum*. La especie *Stachys byzantine* es improbable que sea más resiliente que el *sedum* en condiciones de sequía en las cubiertas extensivas, pero se mostró como una especie capaz de adaptarse a las condiciones de sequía, adaptando su metabolismo. Por otro lado, Vijayaraghavan y Joshi<sup>200</sup> identificaron especies locales aptas para una cubierta ajardinada en un clima tropical o húmedo, como la *Portulaca grandiflora*, con características similares al *sedum*. Schweitzer y Erell<sup>201</sup> estudiaron cuatro plantas locales para emplear en cubiertas ajardinadas extensivas en climas cálidos y secos, identificando la *Aptenia cordifolia* como una especie eficiente en sequía y que consume poca agua, aportando un buen enfriamiento por unidad de agua requerida.



Figura 4.30. Especies vegetales alternativas al uso del *sedum*: *Stachys byzantine* (A), *Portulaca grandiflora* (B), *Aptenia cordifolia* (C).

Por último, se puede hablar de una propiedad de la vegetación que no se suele considerar en la elección de las especies pero que, si se amplía la investigación acerca de ella, puede ser bastante relevante: la fitorremediación. Consiste en la eliminación de contaminantes, disolviéndolos a través de la fitoextracción, y procesando contaminantes gaseosos a través de la fitovolatilación<sup>202</sup>. Un ejemplo claro de la escasa importancia que se le da a esta característica es que el *sedum*, tan ampliamente usado, es un pobre mitigador de los contaminantes del aire. Vijayaraghavan *et al.*<sup>203</sup> experimentaron en cubiertas ajardinadas con y sin vegetación, concluyendo que las cubiertas con *sedum* acumulan varios iones de metales ligeros (Na, K, Ca y Mg,) y también metales pesados (Fe, Cu y Al). Años después Vijayaraghavan y Joshi<sup>204</sup> estudiaron la fitorremediación de la *Portulaca grandiflora*, que mostró una importante habilidad para retener Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Cr, Cu, N, Z, Cd y Pb contenidos en aguas contaminadas de lluvia, a la vez que neutralizaba el ácido natural del agua de lluvia.

#### 4.1.11.1 Vegetación en cubiertas extensivas

De acuerdo con la NTJ 11C, las especies adecuadas para el uso en cubiertas extensivas son las suculentas, herbáceas perennifolias, cespitosas y vivaces<sup>205</sup>.

198 Blanusa, T., Monteiro, M.M.V., Fantozzi, F., *et al.* 2013.

199 *Ibíd.*

200 Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M. 2014.

201 Schweitzer, O., Erell, E. 2014.

202 Rowe, D.B. 2011.

203 Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M., Balasubramanian, R. 2012.

204 Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M. 2014.

205 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.



Las propiedades más importantes que debe cumplir la vegetación que se emplee en cubiertas ajardinadas extensivas son:

- Elevada capacidad de cobertura del sustrato y rápido desarrollo. Así protege el sustrato de la radiación solar directa, retrasa el crecimiento de malas hierbas (disminuyendo los trabajos de mantenimiento) y limita la erosión del sustrato, especialmente en el caso de cubiertas inclinadas<sup>206</sup>. Aparte, el uso de la vegetación como un manto de la superficie también permite captar y retener más humedad<sup>207</sup>.
- Raíces duras y cortas<sup>208</sup>.
- Poca altura. Se minimizan los efectos negativos de la acción del viento<sup>209</sup>. Altura de crecimiento normal inferior a 50 cm<sup>210</sup>.
- Fitorremediación. Se debe establecer una relación entre la especie vegetal en cuestión y su capacidad de tratamiento de los agentes contaminantes del aire y el agua<sup>211</sup>.
- Capacidad de sobrevivir en condiciones climáticas extremas<sup>212</sup>: fuerte insolación, acción del viento, altas temperaturas o encharcamientos temporales<sup>213</sup>.
- Resistencia a las sequías<sup>214</sup>.
- Capacidad de sobrevivir con pocos nutrientes<sup>215</sup>.
- Fomento de una mayor evapotranspiración<sup>216</sup>.
- Reducción de la temperatura del aire del entorno (reducción del efecto de isla de calor)<sup>217</sup>.
- Buena capacidad de autorregeneración<sup>218</sup>.

Diferentes estudios, como el de VanWoert *et al.*<sup>219</sup>, muestran el *sedum* como la especie más adecuada, debido a sus raíces poco profundas, su elevado almacenamiento de agua y su capacidad de regular la apertura de sus estomas en condiciones de estrés térmico (limitando su apertura y las pérdidas de agua por evapotranspiración), aparte de que puede sobrevivir largos periodos sin agua (hasta cinco semanas continuadas de sequía)<sup>220</sup> y con un aporte mínimo o inexistente de fertilizantes<sup>221</sup>. Pero las especies *sedum* también muestran inconvenientes como, por ejemplo, los peores valores de resistencia térmica de la cubierta, ya que bajo sus hojas no se puede producir transferencia de calor por convección<sup>222</sup> o la escasa superficie de hoja (bajo LAI)<sup>223</sup>. Otros problemas son, como ya se ha mencionado, que no siempre se trata de vegetación local, la cobertura del suelo no es uniforme, la tasa de crecimiento es baja y la biodiversidad limitada<sup>224</sup>. Respecto a este último punto, supone un importante problema ya que se ha observado que la mezcla de varias especies vegetales presenta mayor probabilidad de éxito que un monocultivo, especialmente en condiciones de sequía y altas temperaturas<sup>225</sup>. Rayner *et al.*<sup>226</sup> también concluyeron que la mayor suculencia de las hojas de

206 Cascone, S. 2019.

207 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

208 Cascone, S. 2019.

209 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

210 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

211 Vijayaraghavan, K. 2016.

212 Cascone, S. 2019.

213 Cruz, A.I. 2017.

214 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

215 Cascone, S. 2019.

216 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

217 *Ibidem*.

218 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

219 VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005b.

220 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

221 Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N. 2021.

222 Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A. 2014.

223 Vestrella, A. 2016.

224 *Ibidem*.

225 MacIvor, J.S., Lundholm, J. 2011; Nagase, A., Dunnett, N. 2010.

226 Rayner, J.P., Farrell, C., Raynor, K.J., *et al.* 2016.





algunas especies *sedum* puede ser un inconveniente en climas fríos con heladas, donde esta característica se asocia con una menor supervivencia.

Dentro de la vegetación para sistemas extensivos, incluso también aplicable en sistemas semiintensivos, se puede encontrar la variedad de cubierta ajardinada **biodiversa**, cuyo diseño es similar pero su función es la de aportar un espacio de desarrollo de un hábitat con una flora y una fauna determinadas. Puede incluir además materiales orgánicos varios, como troncos y restos vegetales, al tiempo que puede permanecer temporalmente sin vegetación a la espera de que la vegetación autóctona de la zona colonice este espacio, ya que la intención es que se devuelva o incremente en superficie parte del hábitat que existía previamente a la construcción del edificio<sup>227</sup>.

#### 4.1.11.2 Vegetación en cubiertas semiintensivas

De acuerdo con la NTJ 11C, las especies adecuadas para el uso en cubiertas semiintensivas son las herbáceas perennifolias, cespitosas, vivaces, subarbusivas y arbustivas<sup>228</sup>.

Por lo demás, las propiedades que deben tener son las mismas que para las cubiertas extensivas.

#### 4.1.11.3 Vegetación en cubiertas intensivas

En las cubiertas intensivas las especies a emplear, al igual que los posibles diseños, son casi ilimitados, por lo que únicamente se plantean condicionantes en el caso de instalar arbustos, árboles o palmeras de grandes dimensiones, siendo necesario un control exhaustivo de su ubicación<sup>229</sup>. De acuerdo con la NTJ 11C las especies más comunes en este tipo de cubierta son las herbáceas cespitosas, subarbusivas, arbustivas y arbóreas<sup>230</sup>.

Se recomienda emplear vegetación con sistemas radicales poco profundos, con un porte adulto pequeño o mediano y de crecimiento lento, además de ser aconsejable agrupar las especies vegetales en función de que pertenezcan a cada uno de los grupos mencionados anteriormente (plantas herbáceas, arbustivas, arbóreas, etc.). De esta forma se tienen en cuenta las necesidades de espesor de capa de sustrato, exposición a la radiación solar, etc. de cada especie, favoreciendo además la biodiversidad y viabilidad de la cubierta<sup>231</sup>.

Dentro de las posibilidades de una cubierta intensiva, hay dos subtipologías en concreto que merecen una mención especial dentro de las cubiertas intensivas, de acuerdo con lo establecido en la guía de la FLL<sup>232</sup>:

- Huertos. Se trata de una forma especial de cubierta intensiva que posibilita el cultivo regular de alimentos. En este caso la cubierta debe ser especialmente segura para los trabajos periódicos de recolecta, siembra y mantenimiento, aparte de ser necesario un espacio para el almacenamiento de las herramientas de cultivo.
- Zonas verdes con césped. Se trata de zonas para juegos, deportes, etc. Esta variedad de cubierta intensiva necesita una elevada cantidad de agua y un sistema de riego, ya que las raíces cortas del césped no permiten absorber agua de las zonas más profundas del sustrato. El aporte de nutrientes también debe ser regular. Esta cubierta es intensiva no tanto por el espesor del sustrato o el peso, sino por las exigencias de mantenimiento.

227 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

228 Ibídem.

229 FLL. 2018.

230 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

231 Ibídem.

232 FLL. 2018.



#### 4.1.12 Sistema de riego

El sistema de riego se plantea como una solución al limitado almacenamiento de agua en la cubierta ajardinada, ya sea por la frecuencia de las precipitaciones, las necesidades hídricas de la vegetación o la limitación de peso de la cubierta<sup>233</sup>. Cualquiera que sea el sistema de riego empleado, y tanto si es en cubiertas intensivas como en extensivas o semiintensivas, resulta importante regular el agua suministrada en función de las necesidades de la vegetación (para evitar excesos o defectos)<sup>234</sup> y también teniendo en cuenta la radiación solar, la temperatura, las precipitaciones habituales, el tipo de sustrato y las diferentes necesidades hídricas en el caso de que haya varias especies vegetales<sup>235</sup>. Este ajuste del riego es especialmente importante durante los periodos de establecimiento de la vegetación, tratando de evitar que se llegue a un contenido nulo de humedad en el sustrato<sup>236</sup>. Una vez realizada la plantación de la vegetación se debe realizar un primer riego saturando el WHC del sustrato<sup>237</sup>.

En cubiertas extensivas, una vez la vegetación se encuentra desarrollada y en un periodo de madurez, el riego no es un factor crítico, de acuerdo con VanWoert *et al.*<sup>238</sup>, por lo que se recomienda que las dosis de riego se vayan reduciendo progresivamente conforme la vegetación vaya cubriendo el sustrato, manteniendo la instalación de riego para su posible uso como elemento de apoyo en épocas de sequías largas y sucesivas<sup>239</sup>. En cubiertas intensivas, en función de las necesidades hídricas de la vegetación y de las condiciones climáticas se puede plantear que el sistema de riego esté en funcionamiento siempre, regulando la cantidad de agua en función de las estaciones o el cambio de vegetación. En el caso de cubiertas inclinadas, sean del tipo que sean, es necesario colocar riego para evitar el fallo de la vegetación en épocas de sequía y minimizar la erosión del sustrato, ya que en estos casos el almacenamiento de agua en el sustrato o la capa drenante es muy limitado, y el agua de lluvia se drena mucho más rápidamente debido a la pendiente<sup>240</sup>.

Los sistemas de riego que se pueden emplear son:

- **Riego con aspersores o difusores.** Simula la lluvia, pero parte del agua se evapora por el calor o es arrastrada por el viento antes de llegar al sustrato<sup>241</sup>. Actualmente en el mercado hay fabricantes que han desarrollado emisores por aspersión que trabajan a menor presión y con un grueso de gota mayor y más pesado, minimizando el efecto de arrastre por el viento<sup>242</sup>.
- **Riego por goteo.** Es el más adecuado, ya que no malgasta agua; evita la acumulación de agua y el aumento de peso sectorizado, ya que distribuye el agua de manera más controlada. Además, evita pérdidas de agua por evaporación ya que es un sistema enterrado, que se basa en proveer pequeñas cantidades de agua con alta frecuencia, cerca de las raíces de la planta, por lo que el agua se distribuye por capilaridad<sup>243</sup>. En el caso de cubiertas inclinadas, se recomienda la instalación de este sistema de riego, ubicado en la cumbre<sup>244</sup>.

Sea cual sea el sistema de riego, se recomienda aprovechar el agua de lluvia o instalar un sistema de depuración para emplear las aguas grises producidas por el edificio<sup>245</sup>. Las aguas grises son entre el 65-90 % del agua desperdiciada por una vivienda, originada habitualmente en lavadoras, lavabos o cocina, por lo que su empleo en el riego de una cubierta ajardinada permite optimizar recursos y conseguir un diseño

233 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

234 *Ibidem*.

235 Ajuntament de Barcelona. 2015.

236 Manso, M., Teotónio, I., Silva, C.M., *et al.* 2021; VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005b.

237 DANOSA España. 2014.

238 VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., *et al.* 2005b.

239 Ajuntament de Barcelona. 2015.

240 FLL. 2018.

241 Cascone, S. 2019.

242 Ajuntament de Barcelona. 2015.

243 Ajuntament de Barcelona. 2015; Cascone, S. 2019; Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

244 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

245 Ajuntament de Barcelona. 2015.



más sostenible<sup>246</sup>. Además, las aguas grises que provienen de la cocina son ricas en nutrientes, por lo que se minimizaría el uso de fertilizantes<sup>247</sup>. Aun así, hay pocas investigaciones al respecto, y aquellas que se han realizado no acaban de mostrar un buen comportamiento de la cubierta ajardinada con el riego de aguas grises. Ouldboukhitine *et al.*<sup>248</sup> aplicaron simuladamente aguas grises en una serie de cubiertas ajardinadas, obteniendo una reducción en la resistencia térmica de la cubierta del 30 % con este sistema de riego con agua reutilizada.

#### 4.1.13 Sistema de evacuación de agua

La principal función del sistema de evacuación es garantizar la salida de agua en caso de lluvia, cuando la cantidad de agua supere la capacidad de almacenamiento del sistema de la cubierta ajardinada, evitando aumentar la carga de la cubierta y los desbordamientos por fachada<sup>249</sup>. Los principales elementos de la red de evacuación son: imbornales, gárgolas, canales en el pavimento y canalones<sup>250</sup>. Los elementos que no sean perimetrales y que vayan integrados en el interior de la cubierta ajardinada se distribuirán regularmente y se colocaran bajo la capa drenante y convenientemente protegidos<sup>251</sup>.

Debido a que la cubierta ajardinada, en la vegetación, el sustrato y la capa drenante o retenedora de agua, es capaz de almacenar gran cantidad de agua, los elementos de evacuación son menores en número y en dimensiones respecto a una cubierta tradicional, por lo que el coste de la red de evacuación también será menor<sup>252</sup>. Para dimensionar el drenaje se empleará, de acuerdo con la guía de la FLL, el  $C_s$  (coeficiente de escorrentía), cuyos valores orientativos se pueden observar en tabla 4.14, dependiendo de la pendiente de la cubierta y el espesor del sustrato<sup>253</sup>.

ESPESOR DE SUBSTRATO (cm)	PENDIENTE	
	Hasta 10 % (5 °)	Mayores al 10 % (5 °)
> 50	$C_s = 0,1$	-
25 – 50	$C_s = 0,2$	-
15 – 25	$C_s = 0,3$	-
10 – 15	$C_s = 0,4$	$C_s = 0,5$
6 – 10	$C_s = 0,5$	$C_s = 0,6$
4 – 6	$C_s = 0,6$	$C_s = 0,7$
2 – 4	$C_s = 0,7$	$C_s = 0,8$

Tabla 4.14. Valores orientativos del coeficiente de escorrentía.

246 Vijayaraghavan, K. 2016.

247 *Ibidem*.

248 Ouldboukhitine, S.-E., Spolek, G., Belarbi, R. 2014.

249 Ajuntament de Barcelona. 2015.

250 *Ibidem*.

251 Britto, C. 2001.

252 Ajuntament de Barcelona. 2015.

253 FLL. 2018.



## 4.2 CONSIDERACIONES DE EJECUCIÓN

### 4.2.1 Soporte resistente y pendiente

Las cubiertas ajardinadas se pueden instalar en pendientes de hasta del 100 % (45 °) aunque las pendientes entre el 2 % y 5 % son especialmente recomendables para cualquier tipo de cubierta ajardinada y para la captación y el almacenamiento de agua<sup>254</sup>. No se recomiendan pendientes menores al 2 %, ya que se pueden generar problemas por acumulación de agua y un mal drenaje, pudiéndose secar la vegetación de una parte de la cubierta, mientras otra se pudre debido a los encharcamientos<sup>255</sup>. En el caso de no poderse evitar las pendientes menores al 2 %, es posible solucionar los problemas descritos aumentando el espesor de la capa drenante<sup>256</sup>.

En el caso de pendientes mayores al 10 % (aproximadamente 5 °) se recomienda la instalación de cubiertas extensivas, aparte de tener en cuenta una serie de recomendaciones constructivas especiales<sup>257</sup>, como la instalación de paneles de EPS para evitar el deslizamiento del sustrato (Figura 4.31, superior). En el caso de las cubiertas intensivas, especialmente si llevan riego, se deben evitar las pendientes pronunciadas, ya que, a mayor pendiente, la escorrentía adquiere mayor velocidad y se produce menor almacenamiento de agua y mayor erosión del sustrato<sup>258</sup>. Por encima de una inclinación del 10 % estos problemas se deben compensar con una capa drenante con unas capacidades de almacenamiento de agua elevadas o con vegetación con bajas necesidades hídricas (hecho por el cual se recomienda la instalación de cubiertas extensivas)<sup>259</sup>.

En pendientes mayores a 30 % se requiere de la colocación de tejidos antierosión, como mantas de yute grueso o coco sobre el sustrato (véase apartado 4.1.9), al igual que en el caso de que la cubierta se encuentre expuesta a fuertes vientos, sea cual sea su pendiente<sup>260</sup>. También es recomendable instalar estructuras de soporte y amarres para evitar que las láminas, como la impermeabilización, se deslicen hacia la parte baja del faldón<sup>261</sup>. En cubiertas de mayor pendiente es necesaria la colocación de barreras antiempuje adicionales en el sustrato (Figura 4.31, inferior), ancladas a la subestructura de la cubierta, impermeabilizadas individualmente, y separadas 10 metros en pendientes mayores al 40 %, 8 metros en pendientes mayores a 50 % y 5 metros en pendientes mayores a 60 %<sup>262</sup>. A partir de pendientes del 40 % también se debería intentar limitar el número de capas, para disminuir al mínimo los deslizamientos entre ellas y hacia el alero<sup>263</sup>, por lo que se recomienda el uso de una lámina impermeable antiraíces, evitando la disposición de una capa adicional solo antiraíces<sup>264</sup>. En cuanto a la vegetación, se recomienda que en pendientes mayores al 50 % se instalen especies suculentas, como las *sedum*, ya que se pueden mantener con poca agua y aseguran una mejor protección antierosiva<sup>265</sup>. En los casos de pendientes de más del 60 %, se recomienda trabajar en toda su área con mantas o módulos precultivados, e igualmente para las cumbreteras y el perímetro de las cubiertas con cualquier pendiente mayor al 20 %<sup>266</sup>. Aun así, la norma NTJ 11C recomienda no instalar sistemas de cubierta ajardinada con pendientes mayores a 60 % (aproximadamente 30 °) debido a posibles problemas de deslizamiento y erosión.

254 Zimmermann, A. 2015.

255 FLL. 2018.

256 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

257 Zimmermann, A. 2015.

258 FLL. 2018.

259 Ibídem.

260 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021b.

261 FLL. 2018.

262 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021b.

263 FLL. 2018.

264 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

265 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021b.

266 Ibídem.



Figura 4.31. Placas nodulares de EPS (sup.) y barreras antiempuje (inf.) para cubiertas inclinadas.

En el caso de cubiertas planas, con pendientes menores al 5 %, es necesaria la ejecución de una capa de formación de pendientes que favorezca la recogida del agua no retenida hacia los sistemas de evacuación. En primer lugar, se dispondrán las maestras y a continuación se formarán las pendientes con material de relleno que deberá tener una resistencia a compresión  $\geq 3$  MPa, como por ejemplo el hormigón en masa o con conglomerantes hidráulicos aligerados, como el hormigón ligero o el celular<sup>267</sup> (Figura 4.32). Por último, sobre el hormigón de pendientes, en el caso de que la superficie haya quedado irregular, se colocará una capa de mortero de regularización, de entre 1-2 cm, realizada con mortero de cemento M-5 N/m<sup>2</sup><sup>268</sup>, con la intención de conseguir una superficie regular, plana (no se aceptarán irregularidades de más de 0,5 cm<sup>269</sup>), seca, limpia y carente de cuerpos extraños sobre la que colocar la lámina impermeable o la barrera de vapor, sin miedo a que sufran daños durante su instalación<sup>270</sup>.

Cuando existan claraboyas o elementos salientes en la cubierta, el elemento pasante o el zócalo de la claraboya deberá ascender hasta 20 cm, como mínimo, por encima del nivel previsible para el substrato en la cubierta ajardinada, o por encima del nivel de acabado del pavimento en la zona transitada, para asegurar un correcto recibido de las láminas impermeables<sup>271</sup>.

267 Cruz, A.I. 2017.

268 *Ibidem*.

269 Ministerio de la Vivienda. 1976.

270 DANOSA España. 2014.

271 DANOSA España. 2014; Ministerio de Fomento. 2022b.



Figura 4.32. Relleno entre maestras de ladrillo para conformar la pendiente de la cubierta plana.

#### 4.2.2 Lámina impermeable

Las láminas impermeables EPDM se disponen en cubiertas convencionales o invertidas de nueva obra, o bien en rehabilitación de cubiertas, en sistema monocapa. En el caso de instalaciones en rehabilitación, debe considerarse la posibilidad de mantener la impermeabilización existente, por lo general de betún modificado. Sea cual sea el estado de la impermeabilización existente se recomienda la colocación de una capa difusora del vapor, tanto si las láminas de betún modificado se van a mantener para su uso como barrera de vapor en cubiertas convencionales o como impermeabilización adicional en cubiertas invertidas. Se debe recordar, en este punto, que las láminas de EPDM son compatibles con el betún<sup>272</sup>.

Respecto a la disposición de las láminas impermeables de EPDM la base de soporte siempre debe ser lisa y regular, como ya se ha comentado previamente. Pueden colocarse sobre una antigua impermeabilización, sobre la formación de pendientes correctamente terminada (con mortero de regulación si fuese necesario) o sobre paneles de aislamiento. En el caso de colocarse semiadheridas o fijadas mecánicamente, los materiales que sirvan de soporte, como los paneles de aislamiento térmico, deben ir completamente adheridos o fijados al soporte resistente<sup>273</sup>.

La colocación de las láminas de EPDM se puede realizar de una de las siguientes formas<sup>274</sup>:

- **No adherida (o lastrada).** En este caso, la cubierta, tanto si es convencional como invertida, dispondrá de un elemento pesado de protección como puede ser grava, pavimento fijo o substrato para cubiertas vegetales. Estos elementos funcionan como lastre de la lámina impermeable que queda justo debajo, si el sistema es convencional, o como lastre del aislante térmico y, bajo él, la lámina de EPDM, si el sistema es invertido.
- **Semiadherida.** En esta solución la lámina impermeable se adhiere al soporte mediante adhesivos compatibles, cubriendo una superficie menor o igual al 50 %, y para ello debe llevar incorporado de fábrica un fieltro sintético en una de sus caras (la que va a ir adherida al soporte). Sistema no recogido por el CTE.
- **Fijada mecánicamente.** Se fija mecánicamente la lámina impermeable al soporte mediante elementos especiales de fijación (perfiles conformados, flejes, discos, placas o platabandas). Estos elementos pueden servir, al mismo tiempo, para fijar mecánicamente al soporte resistente capas inferiores como el aislante térmico o la barrera de vapor.

Las dos últimas soluciones, al ir completamente unidas al soporte, presentan mejores prestaciones frente al viento, evitando que este entre debajo de las láminas y las hinche a modo de vela. Es por ello que, al

272 AENOR. 2009.

273 *Ibidem*.

274 *Ibidem*.



tratarse también de soluciones cuyo coste de construcción y tiempo de ejecución son mucho mayores, se reservan, de acuerdo con la norma<sup>275</sup>, únicamente para cubiertas convencionales con un acabado con la propia lámina impermeable vista. Por lo tanto, en cubiertas donde la lámina no va a quedar vista, tanto si el sistema es convencional como invertido, se emplea el sistema de colocación no adherido, o lastrado.

Por otro lado, sea cual sea el sistema empleado se debe tener en cuenta los solapes entre las diferentes láminas, que siempre se dispondrán contrapeados de una hilera de láminas a la siguiente. Estos solapes, para láminas no adheridas o semiadheridas, deben ser mayores de 5 cm y se realizan con aire caliente (adecuado para materiales de caucho). En el caso del sistema fijado mecánicamente los solapes ascienden hasta valores mayores, 8 o 9 cm, y se realizan con piezas especiales de fijación y aire caliente<sup>276</sup> (Figura 4.33).

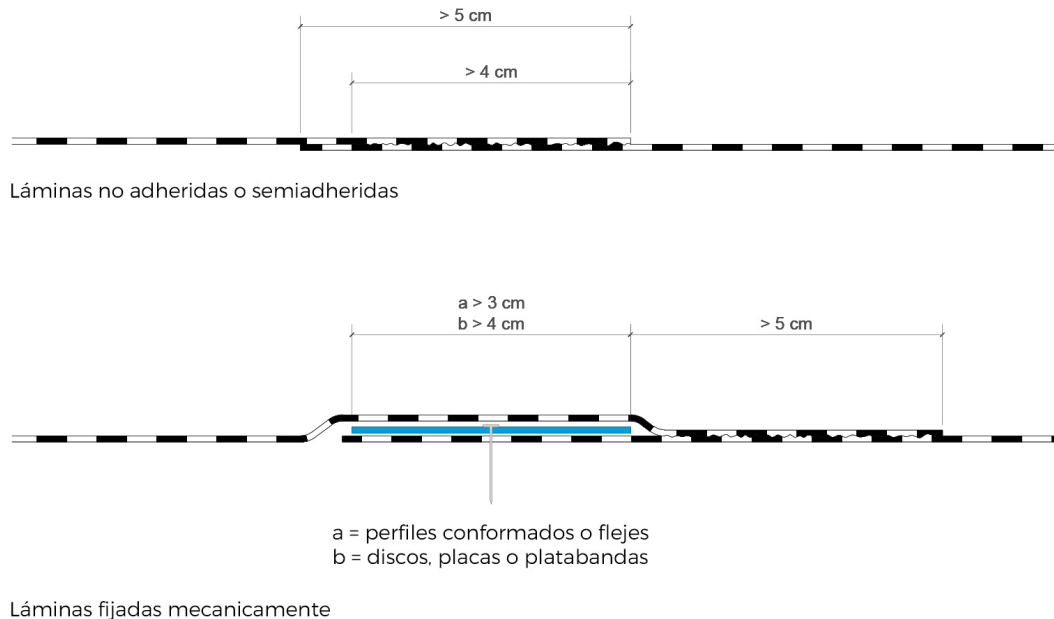


Figura 4.33. Solape de láminas EPDM en función del sistema de colocación.

Sea cual sea el sistema de colocación empleado, siempre que las láminas empleadas experimenten efectos de retracción, se deberán fijar mecánicamente en el perímetro de la cubierta y en los puntos singulares<sup>277</sup>. Vamos a suponer, en todos los casos, que las láminas escogidas experimentan efectos de retracción y, por lo tanto, requieren de estas fijaciones (véase apartado 4.2.8).

Una vez las láminas impermeables estén correctamente dispuestas, se realizará una prueba de servicio. Se procederá a inundar la cubierta (Figura 4.34), obturando previamente los desagües, hasta un nivel aproximado de 5 cm por debajo del punto más bajo de terminación o entrega vertical de la lámina (petos, elementos pasantes, etc.). Se mantendrá la acumulación de agua como mínimo 24 horas y como máximo 72 horas, comprobando que no haya filtraciones o fallos en la instalación de las láminas. Se recomienda hacer una segunda prueba de servicio una vez se haya dispuesto la protección y elementos auxiliares de la cubierta (como, por ejemplo, mobiliario, si lo hubiera). En este caso, si la cubierta no se puede inundar (como ocurre en el caso de ser ajardinada) se procederá a un riego continuo de toda la superficie de la cubierta durante 48 horas, como mínimo<sup>278</sup>.

Por lo tanto, debido a las características de las cubiertas estudiadas (cubiertas con acabado pesado de tierra) se optará por láminas de EPDM con efectos de retracción con colocación no adherida, tal como indica la norma<sup>279</sup>, en sistema de cubierta invertida. A pesar de que las láminas EPDM son resistentes a la penetración de raíces se dispondrá una lámina antiraíces independiente sobre la impermeabilización, quedando del lado de la seguridad.

275 AENOR. 2009.

276 *Ibidem*.

277 *Ibidem*.

278 *Ibidem*.

279 *Ibidem*.



Figura 4.34. Prueba de estanqueidad una vez instaladas las láminas impermeables de EPDM.

#### 4.2.3 Capa drenante

La capa drenante se debe instalar teniendo en cuenta la inclinación de la cubierta, el tipo de superficie y la planeidad, siendo las tolerancias máximas que se pueden aceptar, medidas en una distancia de 4 m y en función del espesor de la capa drenante<sup>280</sup>:

- Con una capa drenante de menos de 10 cm de espesor: 1 cm.
- Con una capa de entre 10-20 cm: 1,5 cm.
- Con una capa de más de 20 cm: 2 cm.

En cubiertas con pendientes menores al 2 % las posibles irregularidades se deben compensar con, por ejemplo, láminas drenantes de mayor espesor, evitando a toda costa los encharcamientos o la distribución irregular de agua<sup>281</sup>.

#### 4.2.4 Substrato

La colocación del substrato no implica muchas dificultades constructivas, aunque sí que se recomienda que para espesores totales superiores a 35-40 cm se estratifique el substrato, dejando la capa inferior exenta (o con una baja proporción) de materia orgánica para minimizar la degradación del substrato, con el paso del tiempo, y el hundimiento<sup>282</sup>. Este es el sistema más sencillo de estratificación, aunque también existen otros. Un segundo método de colocación consistiría en la distribución del substrato en dos o tres capas con diferentes características de drenaje, un tercer método consistiría en el uso de bandejas modulares de vegetación ya precultivada (Figura 4.35) y, por último, también se podría emplear un tepe o manta fina de plástico o goma, integrada, precultivada y flexible (Figura 4.36), que contiene en sí misma substrato y vegetación. Una ventaja del sistema de bandejas modulares frente al resto de sistemas es que pueden sustituirse fácilmente uno o varios módulos en caso de deterioro<sup>283</sup>.

En el caso de que no se considere una estratificación con capas substrato de características diferentes, este se debe extender, igualmente, en tongadas de 20 cm de espesor, como máximo, esperando que la capa inferior se compacte de manera natural para aplicar la siguiente<sup>284</sup>.

280 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

281 FLL. 2018.

282 DANOSA España. 2014.

283 Sutton, R.K. 2015.

284 Ministerio de la Vivienda. 1976; Novoa, W.A. 2016.





Figura 4.35. Bandejas modulares precultivadas.



Figura 4.36. Tepes o mantas precultivadas.

#### 4.2.5 Vegetación: sistema de plantación

Por lo general, la capa de vegetación se puede instalar en cualquier época del año, siempre que no se produzcan heladas, aunque se recomienda que la plantación o la colocación de tepes o mantas vegetales se realice entre abril y junio o entre septiembre y noviembre<sup>285</sup>. Como ya se ha mencionado previamente, la cubierta ajardinada no se encuentra establecida completamente hasta que no se desarrolla la capa de vegetación, considerándose suficiente entre 12 y 15 meses para que se produzca una cobertura del 60 % o más<sup>286</sup>.

A la hora de instalar la vegetación no solo se debe tener en cuenta la configuración de la cubierta, las zonas con sombra o las pendientes, sino que también es necesario un control de elementos como las salidas de aire de los sistemas de ventilación y refrigeración, que pueden causar daños por congelación o secado en las plantas<sup>287</sup>. Igualmente, se debe estudiar la ubicación de chimeneas y salidas de humos<sup>288</sup>. Respecto a la instalación de especies arbustivas y árboles, sean del porte que sean, deben ir anclados al sistema de la cubierta para asegurar su estabilidad<sup>289</sup>, y en el caso de árboles de gran porte, será necesaria su ubicación coincidiendo con los ejes de los soportes de la estructura, ya que se trata de zonas con mayor refuerzo estructural y capaces de soportar mayores cargas sin fallos o deformaciones<sup>290</sup>.

285 Zimmermann, A. 2015.

286 Ibídem.

287 FLL. 2018.

288 Ibídem.

289 Zimmermann, A. 2015.

290 Ministerio de la Vivienda. 1976.



Respecto a los sistemas de instalación de la vegetación, las opciones son las siguientes:

- **Siembra seca.** Puede ser con o sin adhesivos. Los sistemas sin adhesivos son habituales para gramíneas y especies similares, en cubiertas intensivas o extensivas con un bajo nivel de exigencia contra la acción del viento y la erosión<sup>291</sup>. En este caso, se recomienda el uso de mallas de protección una vez esparcidas las semillas, para evitar daños debidos al viento o a pájaros<sup>292</sup>. Por otro lado, un ejemplo de sistema con adhesivos es la hidrosiembra, método que consiste en la aplicación a gran presión, sobre la superficie del sustrato, de una suspensión homogénea de agua, semillas y aditivos<sup>293</sup> (Figura 4.37). Este sistema es apto para cubiertas extensivas de gran tamaño, permitiendo la distribución uniforme de las semillas y aportando una protección desde el principio frente a la erosión del viento o la lluvia<sup>294</sup>. La vegetación instalada con siembra seca puede llegar a conseguir una cobertura entre el 60-80 % en un año, aproximadamente<sup>295</sup>. Las épocas adecuadas de instalación de la vegetación mediante este sistema son primavera y otoño<sup>296</sup>.
- **Dispersión.** Instalación separada de brotes, esquejes, rosetas, tubérculos, bulbos o rizomas<sup>297</sup>. Las épocas adecuadas son, al igual que con la siembra, primavera y otoño<sup>298</sup>.
- **Tepe o manta precultivada.** Consiste en cubrir la superficie con forros precultivados (Figura 4.36) que pueden ser durables o biodegradables, y que se fijan a una malla soporte previamente instalada<sup>299</sup>. Este sistema es especialmente adecuado cuando se necesita un mayor grado de protección frente a la erosión y/o un mayor e inmediato grado de cubrición<sup>300</sup>. El sistema de instalación por tepe o manta, tanto en este caso como en el siguiente (césped) se puede realizar en cualquier época del año<sup>301</sup>.
- **Tepe o manta de césped.** Se suele usar, principalmente, en cubiertas intensivas para recrear una estética de pradera<sup>302</sup>, y pueden incluir refuerzo o no<sup>303</sup>. En el caso de que se instalen en pendientes especialmente complejas o pronunciadas, se recomienda reforzar el tepe o manta con fijaciones a cuñas de madera<sup>304</sup>.
- **Plantación de plántulas.** Instalación de plantas individuales ya en estado maduro, o cercano, o con bandejas precultivadas<sup>305</sup> (Figura 4.38).

Se recomienda la combinación de varios sistemas de plantación en la misma cubierta para mejorar el comportamiento frente al viento o la lluvia, la cubrición, el desarrollo y el crecimiento de la vegetación<sup>306</sup>. En el caso de cubiertas extensivas, resulta especialmente interesante la plantación de plántulas para asegurarse que la vegetación crezca con éxito, aunque esto supone un sobre coste respecto a otros sistemas, como la siembra<sup>307</sup>. Esta consideración es especialmente importante en climas con estaciones cálidas y secas (como el clima mediterráneo) que pueden aumentar la mortalidad de las especies vegetales antes de que hayan llegado a consolidarse<sup>308</sup>.

291 FLL. 2018; Zimmermann, A. 2015.

292 Novoa, W.A. 2016.

293 Britto, C. 2001.

294 FLL. 2018; Zimmermann, A. 2015.

295 Zimmermann, A. 2015.

296 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

297 Cruz, A.I. 2017; FLL. 2018.

298 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

299 FLL. 2018; Novoa, W.A. 2016.

300 Zimmermann, A. 2015.

301 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

302 Zimmermann, A. 2015.

303 FLL. 2018.

304 Zimmermann, A. 2015.

305 FLL. 2018.

306 Cruz, A.I. 2017.

307 Walters, S.A., Midden, K.S. 2018.

308 Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N. 2021.



Figura 4.37. Instalación de vegetación mediante hidrosiembra.



Figura 4.38. Instalación de vegetación mediante elementos o bandejas precultivadas.

#### 4.2.6 Particularidades de sustrato y vegetación en el clima mediterráneo

Como se ha indicado en el apartado 3.1.3.2, es posible organizar cubiertas ajardinadas en la zona mediterránea. Los resultados de las investigaciones de Vestrella<sup>309</sup> confirman esta posibilidad, aunque destaca que se necesita de un mayor periodo de tiempo para consolidar la vegetación y conseguir coberturas adecuadas. A conclusiones similares llegaron Nektarios *et al.*<sup>310</sup> al comprobar que 10 meses después de la plantación, mediante semillas de *sedum*, las condiciones cálidas y de escasas o nulas precipitaciones propias del verano del clima mediterráneo redujeron considerablemente el número de plantas vivas, considerando que la espera hasta la primera época de sequía debería haber sido de 12 a 14 meses, o haber realizado una instalación mediante brotes y no una plantación por semillas.

Vestrella<sup>311</sup> también observó, en sus ensayos sobre modelos de cubierta ajardinada cerca de Barcelona (España), que con el tiempo la cubierta tendía a reducir el número de especies (reducir la biodiversidad), aumentando la cantidad y el volumen de aquellas especies que permanecían. Benvenuti<sup>312</sup> también llegó a conclusiones similares sobre la posibilidad de instalación de una cubierta ajardinada en un clima mediterráneo, en su caso tras conseguir buenos resultados en una cubierta ajardinada con flores silvestres en Pisa (Italia).

309 Vestrella, A. 2016.

310 Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N. 2021.

311 Vestrella, A. 2016.

312 Benvenuti, S. 2014.



Respecto al sustrato, Chenot *et al.*<sup>313</sup> concluyeron, tras sus investigaciones sobre cubiertas extensivas en el ámbito mediterráneo, que la combinación que mejor funcionaba respecto al almacenamiento de agua y la mejor colonización de la vegetación era una capa de 15 cm de espesor compuesta en un 75 % por limo y arcilla y en un 25 % por guijarros y arena. Destacaron que en el contexto mediterráneo lo más importante a la hora de escoger el tipo de sustrato es su capacidad de drenaje lento, siendo capaz de conservar la máxima cantidad de humedad durante el máximo tiempo posible. En relación con esta capacidad de almacenamiento de agua en el sustrato, Nektarios *et al.*<sup>314</sup> observaron una reducción del contenido de humedad del sustrato más rápida en cubiertas con una capa de menor espesor (6 cm) en comparación con las cubiertas con mayor espesor de sustrato (12 cm). Se puede suponer que esta diferencia se debe a que el poco espesor del sustrato unido a la proximidad de la capa drenante respecto a la superficie de la cubierta acelera la evapotranspiración, perdiéndose mayor cantidad de humedad en menos tiempo en comparación con la cubierta cuya capa drenante se encuentra a 12 cm de la superficie de la cubierta (en lugar de a 6 cm). Pero, por otro lado, también comprobaron que, en estadios iniciales del desarrollo de la vegetación, las especies de *sedum* con las que trabajaron preferían sustratos de poco espesor, ya que sus raíces poco desarrolladas no llegaban a captar agua por capilaridad de la capa drenante si esta se encontraba a mayores profundidades. Por lo tanto, se debe considerar que sustrato será el más adecuado, y que espesor, en función del tipo de vegetación, su implantación y sus necesidades hídricas.

Respecto al desarrollo y crecimiento de la vegetación, Monteiro *et al.*<sup>315</sup> concluyeron que el sustrato que mejor funcionaba estaba compuesto en un 70 % por arcilla expandida, un 15 % compuesto orgánico y un 15 % cáscara de huevo rota. Martina *et al.*<sup>316</sup>, centrándose en la consecución de una adecuada ligereza y una buena retención de agua, emplearon en sus investigaciones un sustrato formado en un 20 % por lapilli, un 65 % piedra pómez y un 20 % compost. Benvenuti<sup>317</sup>, por su lado, tras ensayar sustratos de 20 cm de espesor, concluyó que era muy difícil conseguir biodiversidad en la cubierta ajardinada en el clima mediterráneo sin un aporte mínimo de riego, aunque se trate de una cubierta extensiva, debido al fuerte estrés hídrico. Por lo tanto, podemos concluir que la capacidad de supervivencia de la vegetación va a depender en gran medida de factores externos a ella, como la capacidad de almacenar y facilitar agua por parte del sustrato y la lámina drenante, a la vez que se intenta no aumentar excesivamente el peso de la cubierta<sup>318</sup>. La cantidad de humedad del sustrato, aun así, no solo afectará al desarrollo de la vegetación, sino que por sí mismo también conlleva consecuencias térmicas y energéticas para la cubierta. Vestrella<sup>319</sup> concluyó que, en los climas mediterráneos, la relación aire/agua del sustrato resultaba de gran importancia en los periodos cálidos, ya que los sustratos sin riego mostraron mayores temperaturas que los sustratos con riego, y por lo tanto mayores flujos de calor a través de la cubierta, debido a la limitación de la evaporación del sustrato y el aumento de su temperatura. Blanusa *et al.*<sup>320</sup> llegaron a la misma conclusión, observando que en sustratos sin vegetación y con suficiente agua se conseguían temperaturas más bajas en comparación con sustratos con un contenido de agua limitado, mostrando la influencia de la evaporación del agua del sustrato en el enfriamiento y en el mejor comportamiento térmico y energético de la cubierta ajardinada.

En cuanto a las características de la propia vegetación, estas configuran el segundo punto crítico, junto al sustrato, para conseguir el éxito de una cubierta ajardinada en el clima caluroso propio de los veranos del Mediterráneo<sup>321</sup>. No solo la cantidad de agua disponible, sino también la velocidad de evapotranspiración de la vegetación o la superficie y densidad de las hojas son factores determinantes en cuanto al desarrollo adecuado de la capa vegetal y la consecución del mejor comportamiento energético del edificio<sup>322</sup>. Además de las propiedades de ahorro energético y reducción de los flujos de calor, en los climas mediterráneos que des-

313 Chenot, J., Gaget, E., Moinardeau, C., *et al.* 2017.

314 Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N. 2021.

315 Monteiro, C.M., Calheiros, C.S.C, Martins, J.P., *et al.* 2017.

316 Martina, P., Fabrizio, C., Giovanni, S. 2020.

317 Benvenuti, S. 2014.

318 Cascone, S. 2019.

319 Vestrella, A. 2016.

320 Blanusa, T., Monteiro, M.M.V., Fantozzi, F., *et al.* 2013.

321 Schweitzer, O., Erell, E. 2014.

322 Cascone, S. 2019; Cruz, A.I. 2017.



tacan por fuertes lluvias torrenciales en los periodos de invierno y otoño, también cabe tener en cuenta las propiedades de la vegetación en cuando a la reducción del volumen de la escorrentía del agua de lluvia<sup>323</sup>. Algunas de las especies vegetales que se presentan adecuadas para su uso en cubiertas ajardinadas extensivas y semiintensivas de la región costera de clima Mediterráneo de España se muestran en la tabla 4.15.

NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA	GRUPO SEGÚN NTJ 11C
<i>Aeonium canariense</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Aeonium sedifolium</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Aethionema grandiflorum</i>	Brassicaceae	Subarbusto o mata
<i>Ajania pacifica</i>	Asteraceae	Subarbusto o mata
<i>Alium sphaerocephalon</i>	Liliaceae	Planta vivaz
<i>Aloe saponaria</i>	Aloaceae	Planta suculenta
<i>Aphyllanthes monspeliensis</i>	Liliaceae	Herbácea cespitosa
<i>Aptenia cordifolia</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Arenaria balearica</i>	Caryophyllaceae	Herbácea perennifolia
<i>Armeria marítima</i>	Plumbaginaceae	Herbácea perennifolia
<i>Brachypodium phoenicoides</i>	Poaceae	Herbácea cespitosa
<i>Camphorosma monspeliaca</i>	Chenopodiaceae	Subarbusto o mata
<i>Capparis spinosa</i>	Capparaceae	Subarbusto o mata
<i>Crassula lactea</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Delosperma lineare</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Disphyma crassifolium</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Drosanthemum floribundum</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Euphorbia resinifera</i>	Euphorbiaceae	Planta suculenta
<i>Faucaria tigrina</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Fenestraria rhopalophylla</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Gasteria acinacifolia</i>	Aloaceae	Planta suculenta
<i>Graptopetalum paraguayense</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Helichrysum rupestre</i>	Asteraceae	Subarbusto o mata
<i>Heliotropium amplexicaule</i>	Boraginaceae	Planta vivaz
<i>Isotoma axillaris</i>	Campanulaceae	Herbácea perennifolia
<i>Kalanchoe delagonensis</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Kalanchoe tomentosa</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Lampranthus blandus</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Limonium pectinatum</i>	Plumbaginaceae	Subarbusto o mata
<i>Lotus creticus</i>	Fabaceae	Subarbusto o mata
<i>Medicago marina</i>	Fabaceae	Herbácea perennifolia
<i>Micromeria juliana</i>	Lamiaceae	Subarbusto o mata
<i>Opuntia compressa</i>	Cactaceae	Planta suculenta
<i>Osteospermum barberae</i>	Asteraceae	Herbácea perennifolia
<i>Pachyphytum oviferum</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Pelargonium x fragrans</i>	Geraniaceae	Subarbusto o mata
<i>Phlomis itálica</i>	Lamiaceae	Subarbusto o mata

323 Schweitzer, O., Erell, E. 2014.



<i>Phyla nodiflora</i>	Verbenaceae	Herbácea perennifolia
<i>Rhodanthemum hosmariense</i>	Asteraceae	Subarbusto o mata
<i>Rhombophyllum rhomboideum</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Ruschia postrata</i>	Aizoaceae	Planta suculenta
<i>Santolina chamaecyparissus</i>	Asteraceae	Subarbusto o mata
<i>Scabiosa farinosa</i>	Dipsacaceae	Subarbusto o mata
<i>Sedum acre</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Sedum album</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Sedum lydium</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Sedum pachyphyllum</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Sedum spurium</i>	Crassulaceae	Planta suculenta
<i>Senecio rowleyanus</i>	Asteraceae	Planta suculenta
<i>Staehelina dubia</i>	Asteraceae	Subarbusto o mata
<i>Teucrium chamaedrys</i>	Lamiaceae	Subarbusto o mata
<i>Thymus serpyllum</i>	Lamiaceae	Subarbusto o mata
<i>Thymus vulgaris</i>	Lamiaceae	Subarbusto o mata
<i>Verbena tenera</i>	Verbenaceae	Herbácea perennifolia
<i>Zephyranthes grandiflora</i>	Amaryllidaceae	Planta vivaz

Tabla 4.15. Especies vegetales aptas para cubiertas extensivas y semiintensiva en la costa mediterránea española.

Cabe destacar que el contenido de humedad en el sustrato y la capacidad de almacenamiento de agua también se ve influenciado por la propia vegetación. De acuerdo con Vestrella<sup>324</sup>, las especies con raíces y hojas más compactas limitan el proceso de evaporación del agua del sustrato, por lo que el contenido de humedad en este será mayor.

Respecto al estudio de las propiedades de la vegetación, Schweitzer y Erell<sup>325</sup> estudiaron una serie de especies en Tel Aviv (Israel) tratando de encontrar aquella que mejor se adaptara a los requerimientos del clima mediterráneo. Por ejemplo, la *Pennisetum clandestinum* desarrollaba un rápido crecimiento, con una red de raíces muy fuerte y densa, consiguiendo buenas reducciones de temperatura en la cubierta, pero consumía una gran cantidad de agua (7-9 L/m<sup>2</sup>) y era la más sensible a la salinidad. La *Aptenia cordifolia* en cambio consumía solo entre 3 y 6 L/m<sup>2</sup> de agua, pero aun así desarrollaba una cobertura de hojas densas que disminuía considerablemente la temperatura de la cubierta y era capaz de sobrevivir largos periodos de sequía (Figura 4.39).

Vestrella<sup>326</sup> estudió 12 especies vegetales autóctonas adaptadas al clima mediterráneo del entorno cercano a Barcelona (España) en base a tres supuestos de riego, analizando factores de mortalidad, cobertura, floración y desarrollo de biomasa. Las especies *Armeria maritima* e *Iris lutescens* (Figura 4.40) mostraron un desarrollo lento, pero constante, y una cobertura baja, aunque también una baja tasa de mortalidad en los veranos cálidos y los picos de frío en invierno, por lo que se consideran adecuadas para las cubiertas ajardinadas del clima mediterráneo, siempre que se aumente la densidad de plantas en el momento de la instalación, compensando así su menor poder de cobertura. En conclusión, determinó que las especies *Centranthus ruber*, *Santolina rosmarinifolia*, *Helichrysum stoechas* e *Iris lutescens* pueden adaptarse a una cubierta ajardinada sin riego (Figura 4.41), mientras que los resultados con *Limonium virgatum*, *Armeria maritima*, *Frankenia leavis* y *Thymus serpyllum* sugieren que estas especies sí que necesitarían un mínimo porte de riego, pero funcionarían bien en una cubierta ajardinada en el clima mediterráneo (Figura 4.42). En cuanto a la biodiversidad en la cubierta ajardinada mediterránea Vestrella<sup>327</sup> concluyó, tras comparar dos

324 Vestrella, A. 2016.

325 Schweitzer, O., Erell, E. 2014.

326 Vestrella, A. 2016.

327 Ibídem.



cubiertas ajardinadas, una con especies subarbusivas y otra con especies tapizantes, que la mayor diversidad se consigue en las especies subarbusivas. Esto se puede deber a la estructura más compleja de estas especies, a una menor cobertura por su parte, que favorece la germinación y supervivencia de especies colonizadoras, y al hecho de que la principal flora de la costa mediterránea española se compone por especies arbustivas y subarbusivas, por lo que ya están adaptadas a la convivencia con la mayoría de las plantas colonizadoras locales<sup>328</sup>.

Por otro lado, Vestrella<sup>329</sup> no aportaba importancia a la floración de la vegetación, considerándolo simplemente como un aspecto estético, mientras que Benvenuti<sup>330</sup> determinó ciertas relaciones entre la floración y su comportamiento ambiental. Las especies con una floración *temprana* o *tardía* se mostraron como las más adecuadas en situaciones de sequía, mientras que desde un punto de vista de aislamiento térmico ocurría lo contrario: funcionaban mejor aquellas especies que florecían en primavera y verano, ya que conseguían mejores coberturas en verano y producían sombra y efecto de enfriamiento.



Figura 4.39. *Pennisetum clandestinum* (izq.), *Aptenia cordifolia* (dcha.).



Figura 4.40. *Armeria maritima* (izq.), *Iris lutescens* (dcha.).



Figura 4.41. *Centranthus ruber* (A), *Santolina rosmarinifolia* (B) y *Helichrysum stoechas* (C).

Benvenuti<sup>331</sup> también destacó que el uso de flores silvestre permitía la composición de una pequeña porción de paisaje silvestre dentro del ecosistema urbano, aumentando la biodiversidad y la presencia de fauna propia de estos entornos (como polinizadores), siempre y cuando exista una correcta conexión con otros es-

328 Cruz, A.I. 2017; Vestrella, A. 2016.

329 Vestrella, A. 2016.

330 Benvenuti, S. 2014.

331 Ibídem.



pacios verdes, generando una Infraestructura Verde fuerte. Monteiro *et al.*<sup>332</sup> concluyeron que las especies aromáticas (también autóctonas de la zona del entorno climático del mediterráneo) eran una buena elección en estos climas, ya que eran capaces de adaptarse a condiciones de altas temperaturas y falta de agua.



Figura 4.42. *Limonium virgatum* (A), *Frankenia leavis* (B) y *Thymus serpyllum* (C).

#### 4.2.7 Sistemas de riego y de evacuación de agua

Respecto al sistema de riego, las líneas fijas de suministro de agua, al igual que el resto de las instalaciones, deberán tenderse preferentemente por los petos perimetrales<sup>333</sup>. En el caso de riego por aspersión, las conducciones hasta los rociadores se dispondrán por la capa drenante<sup>334</sup>. En el caso de que no se instale ningún sistema de riego, se debe proveer al menos una toma de agua en la cubierta para trabajos de mantenimiento, estando adecuadamente protegida contra la congelación en climas fríos<sup>335</sup>.

Respecto al sistema de evacuación de agua, las principales recomendaciones se centran en que sean elementos siempre registrables, para facilitar su mantenimiento y limpieza, y que haya una pendiente mínima del 2 %<sup>336</sup>. En cubiertas que desaguan a sistemas interiores, la cantidad de elementos de evacuación se calcularán en función de la superficie de cubierta y el régimen de lluvias de la zona, pero como mínimo deberán tener un elemento (sumidero, canalón, etc.), y uno de emergencia<sup>337</sup>.

En ningún caso se puede permitir que los elementos de evacuación de agua y el sistema de emergencia se cubran con vegetación o desechos, por lo que se deberían seguir las siguientes recomendaciones, de acuerdo con la guía de la FLL<sup>338</sup>:

- Sistemas de evacuación en zonas con vegetación: ser visibles desde el exterior y con bordes contruidos y/o grava alrededor (véase apartado 4.2.8.1).
- Sistemas de evacuación fuera de zonas con vegetación: en zonas con grava llevarán un paragravillas y en zonas de circulación se colocarán rejillas que queden enrasadas con el pavimento.
- Sistema de evacuación de emergencia: el flujo de agua excesivo que se debe drenar por estos puntos no puede ser interrumpido por ningún elemento, e igual que el resto de elemento deben quedar visibles para su mantenimiento y libres de vegetación.

#### 4.2.8 Puntos singulares en cubiertas planas ajardinadas

Los puntos singulares más importantes en las cubiertas planas ajardinadas son los encuentros con petos perimetrales o elementos salientes, como chimeneas, con elementos del sistema de evacuación de agua y las juntas de dilatación. En los encuentros con los paramentos verticales o petos la lámina impermeable debe ascender mínimo 20 cm por encima de la cota de acabado del substrato; igualmente en los elementos

332 Monteiro, C.M., Calheiros, C.S.C, Martins, J.P., et al. 2017.

333 Ministerio de la Vivienda. 1976.

334 Ibídem.

335 FLL. 2018.

336 Ajuntament de Barcelona. 2015; Ministerio de la Vivienda. 1976.

337 FLL. 2018.

338 Ibídem.





salientes, recorriendo de forma continua todo su perímetro<sup>339</sup>. En cuanto a las juntas, éstas irán ubicadas en las limatesas, y en la cubierta se harán coincidir sus juntas de dilatación (cada 10 metros aproximadamente) con las juntas estructurales del edificio<sup>340</sup>. Por lo general, como se ha indicado en el apartado 4.2.2, se considera que las láminas EPDM experimentan efectos de retracción, por lo que van fijadas mecánicamente mediante perfiles colaminados en el perímetro de la cubierta y en los puntos singulares.

A continuación, se detallan constructivamente estos puntos singulares para cada una de las cubiertas ajardinadas. En cualquiera de los casos se siguen las prescripciones de la sección 1 del CTE DB-HS<sup>341</sup> y, para las láminas impermeables sintéticas de EPDM, la norma UNE 104416<sup>342</sup>.

#### 4.2.8.1. Cubiertas extensivas y semiintensivas

- **Encuentro con paramento vertical** (Figura 4.43). Es recomendable dejar una franja como mínimo de 50 cm sin vegetación. Los materiales a emplear pueden ser gravas o, en el caso de disponer un recorrido perimetral para mantenimiento, se pueden disponer una o más filas de baldosas. En este caso se debería conectar estos recorridos perimetrales con otras franjas de baldosas situadas en las zonas centrales de la cubierta ajardinada para poder acceder a esos puntos sin pisar la vegetación. Tanto las gravas como las baldosas, colocadas con junta abierta, son especialmente adecuadas ya que facilitan el drenaje del agua de lluvia, la evaporación del exceso de agua que se haya podido acumular en la cubierta y la aireación de las raíces. Para la fijación de la lámina impermeable de EPDM se emplearán perfiles colaminados en forma de ángulo, cuyo solape con la lámina principal de la cubierta será mayor a 8 cm<sup>343</sup>. La lámina EPDM es resistente a los agentes atmosféricos, pudiendo quedar la lámina de refuerzo superior vista, pero debiendo estar recubierta en toda su extensión por una lámina antiraíces. Esta lámina de refuerzo superior, que ascenderá por el paramento vertical, deberá solaparse un mínimo de 10 cm con la lámina principal de la cubierta, realizándose el remate vertical con perfiles colaminados, sellados en la parte superior, situados 20 cm por encima del nivel de acabado de la cubierta<sup>344</sup>.

339 Ministerio de Fomento. 2022b; Ministerio de la Vivienda. 1976; Paradela, M.L.S. 2020a.

340 Ministerio de la Vivienda. 1976.

341 Ministerio de Fomento. 2022b.

342 AENOR. 2009.

343 *Ibidem*.

344 *Ibidem*.



- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| 1 Soporte resistente            | 8 Aislante térmico                        |
| 2 Junta perimetral              | 9 Perfil metálico de separación perforado |
| 3 Hormigón ligero de pendientes | 10 Gravas                                 |
| 4 Mortero de regulación         | 11 Capa drenante                          |
| 5 Perfil colaminado             | 12 Substrato                              |
| 6 Lámina impermeable - EPDM     | 13 Vegetación                             |
| 7 Sellado                       |   |

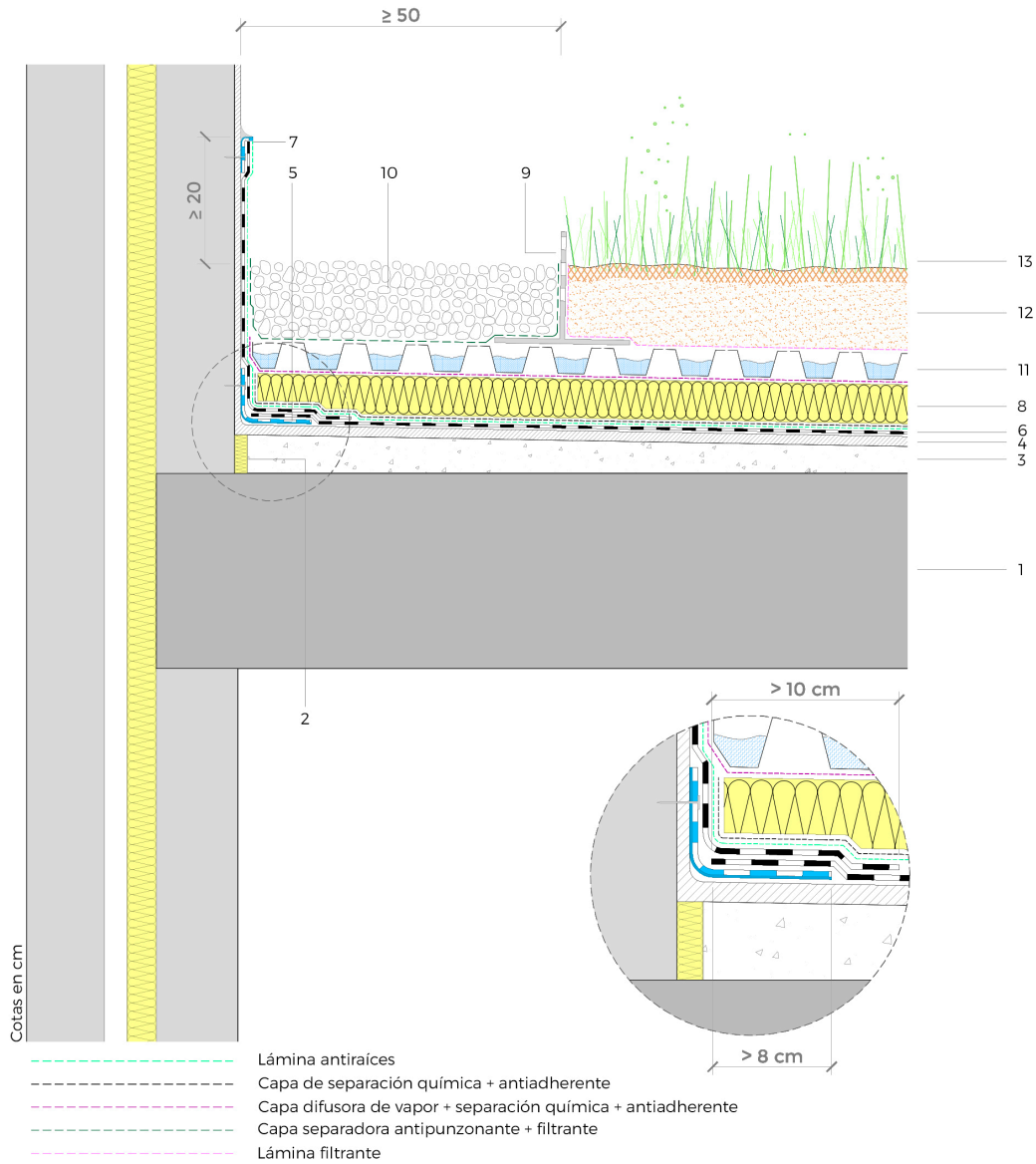


Figura 4.43. Encuentro de cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida con paramento vertical, remate de lámina impermeable con perfil colaminado. Detalle de la unión de la lámina impermeable principal de la cubierta y la lámina de refuerzo superior, mediante perfil colaminado (azul).



- **Encuentro con punto de desagüe** (Figura 4.44 y 4.45). Se recomienda la extensión de grava rodeando el sumidero o el perímetro del canalón para contener la tierra vegetal y evitar que la vegetación invada el punto de evacuación de agua, además de ayudar a evaporar el exceso de agua de lluvia o riego y mejorar la aireación de las raíces en el sustrato. En este caso, el sumidero o canalón deberá disponer de un elemento paragravillas o una caja de registro (prefabricada o *in situ*)<sup>345</sup>. Para el anclaje perimetral de la lámina de EPDM alrededor del sumidero se empleará una corona circular de chapa colaminada de anchura mayor a 5 cm, uniéndose a esta corona la lámina principal de la cubierta<sup>346</sup>. En el caso del canalón, se emplearán una franja de perfil colaminado paralelo al canalón, y con las mismas dimensiones (> 5 cm).

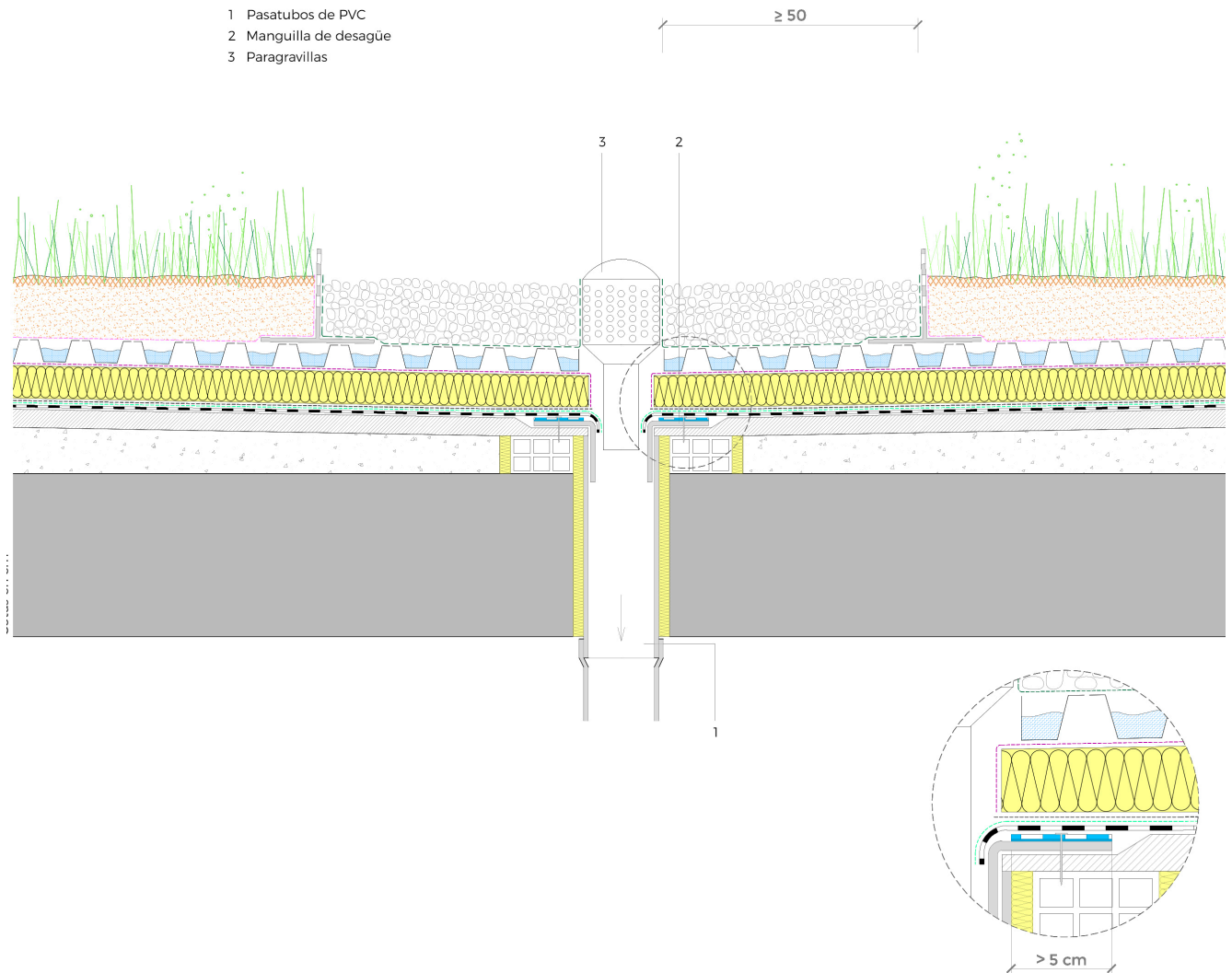


Figura 4.44. Encuentro de cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida con sumidero con paragravillas. Detalle del anclaje perimetral de la lámina impermeable de la cubierta alrededor del sumidero con perfil colaminado (azul).

345 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Paradela, M.L.S. 2020d.

346 AENOR. 2009.



- 1 Barrera de vapor
- 2 Aislante térmico de alta densidad
- 3 Cama del canalón (espesor variable)
- 4 Pieza de canalón prefabricada
- 5 Perfil metálico de separación perforado - Paragravillas

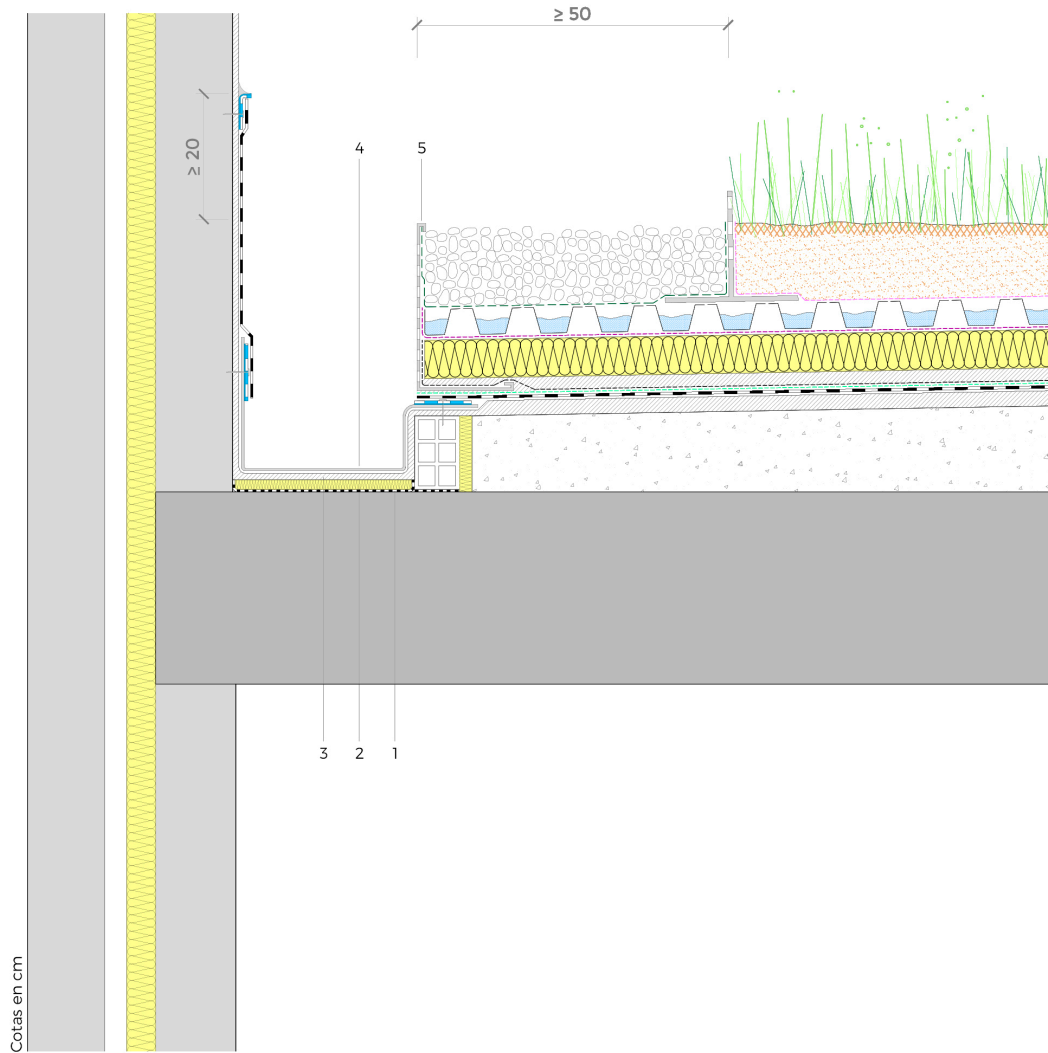


Figura 4.45. Encuentro de cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida con canalón con paragravillas.



- **Junta de dilatación estructural** (Figura 4.46). La lámina impermeable de junta, siempre que se realice con una lámina impermeable de EPDM con la misma flexibilidad que la lámina principal de la cubierta, se situará como refuerzo superior, produciéndose una unión a ambos lados de la junta, con perfiles colaminados de dimensiones mayores a 5 cm, que deberán estar colocados a 30-50 cm de la junta. Los geotextiles y la lámina filtrante no se interrumpen en la junta porque, al no ir adheridas en ningún punto, pueden moverse libremente con la estructura<sup>347</sup>.

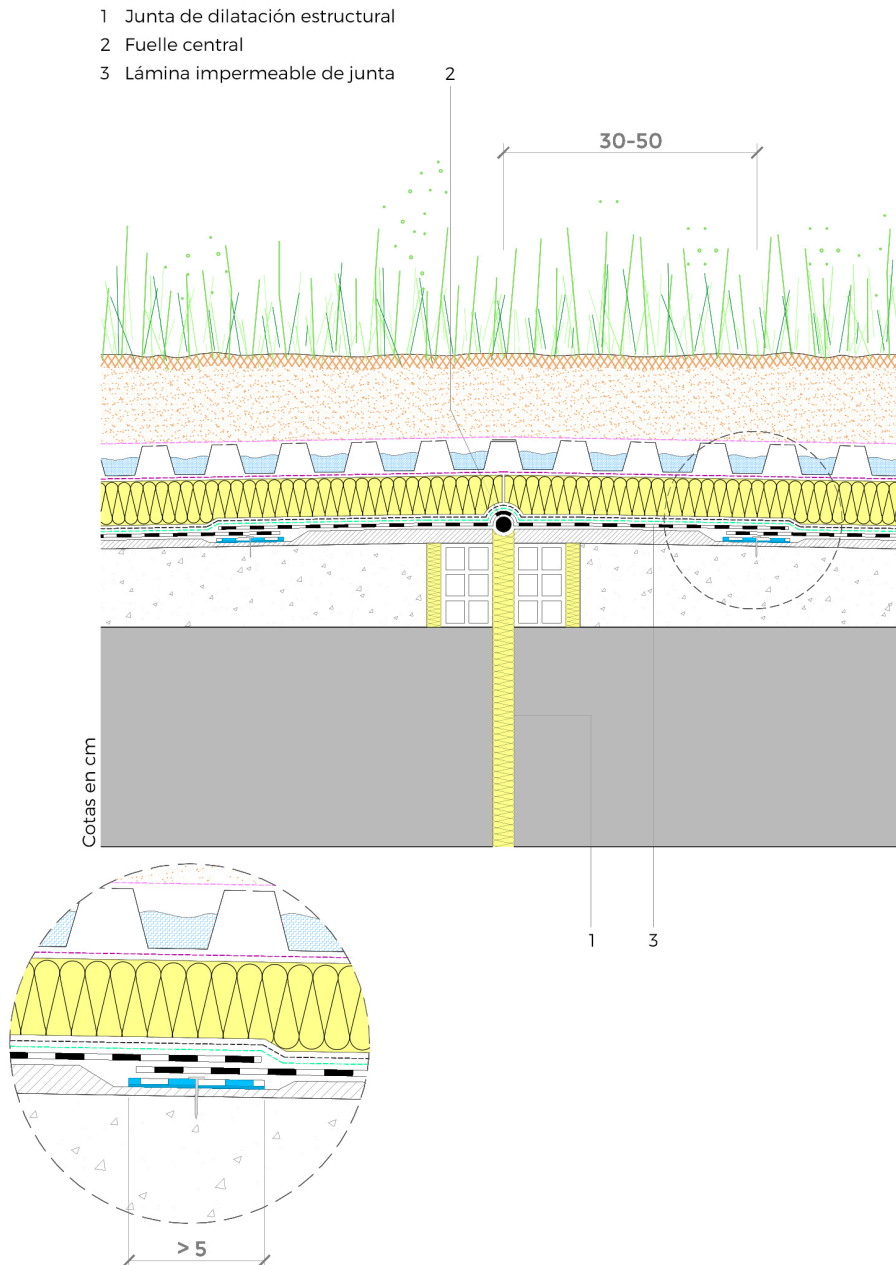
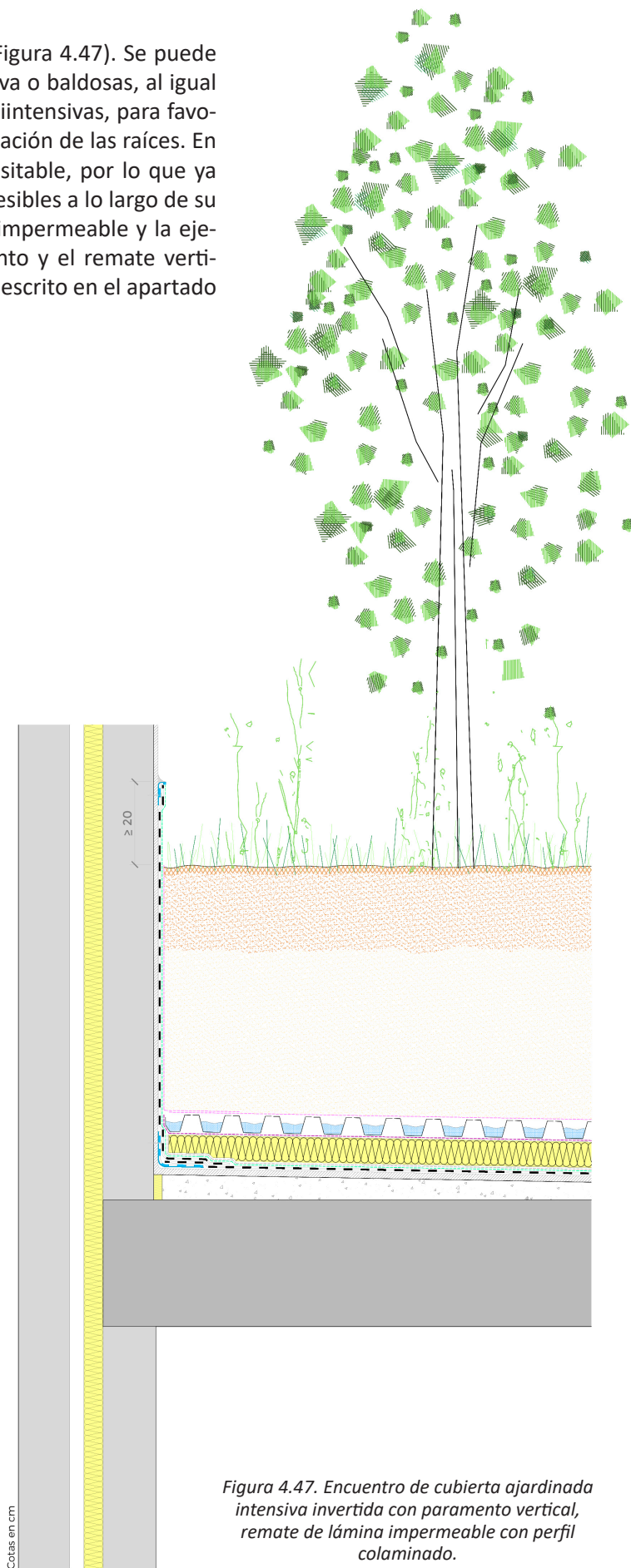


Figura 4.46. Junta de dilatación estructural en cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida. Detalle de la unión de la lámina impermeable principal de la cubierta y la lámina de refuerzo superior, mediante perfil colaminado (azul).



#### 4.2.8.2 Cubiertas intensivas

- **Encuentro con paramento vertical** (Figura 4.47). Se puede disponer una zona perimetral con grava o baldosas, al igual que en las cubiertas extensivas o semiintensivas, para favorecer la evaporación del agua y la aireación de las raíces. En estos casos la cubierta suele ser transitable, por lo que ya dispone de zonas pavimentadas y accesibles a lo largo de su superficie. En relación con la lámina impermeable y la ejecución del encuentro con el paramento y el remate vertical, se realizan de igual forma que lo descrito en el apartado 4.2.8.1.





- **Encuentro con punto de desagüe** (Figura 4.48). Es necesaria la ejecución de muretes de contención de la tierra vegetal alrededor del sumidero mediante perfiles metálicos perforados que permitan el correcto drenaje del agua y la disposición de un perímetro de grava alrededor del punto de recogida de agua, protegiéndolo así de las raíces de la vegetación, de mayor porte en este tipo de cubiertas. Se puede disponer, en un estrato inferior, por debajo de la grava, un relleno inorgánico que permita también el drenaje, pero con un menor tamaño de partícula. En estos casos los sumideros se diseñan permeables en el perímetro para que permitan la entrada de agua a través de todo el espesor del sustrato, siendo registrables en la parte superior para mantenimiento y limpieza<sup>348</sup>.

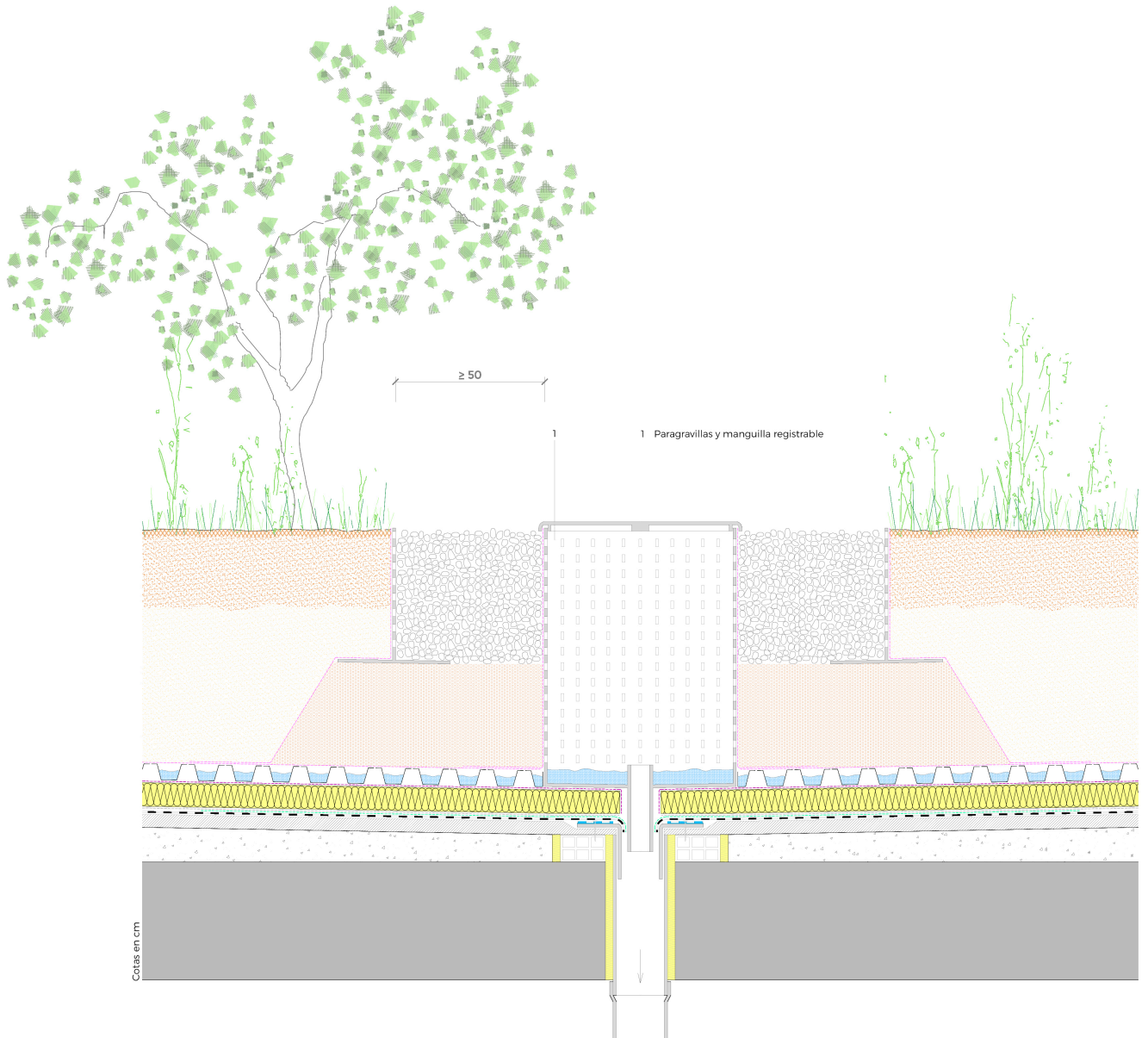


Figura 4.48. Encuentro de cubierta ajardinada intensiva invertida con sumidero.



- **Junta de dilatación estructural** (Figura 4.49). La lámina impermeable de junta se coloca a modo de refuerzo superior, al igual que en el apartado 4.2.8.1.

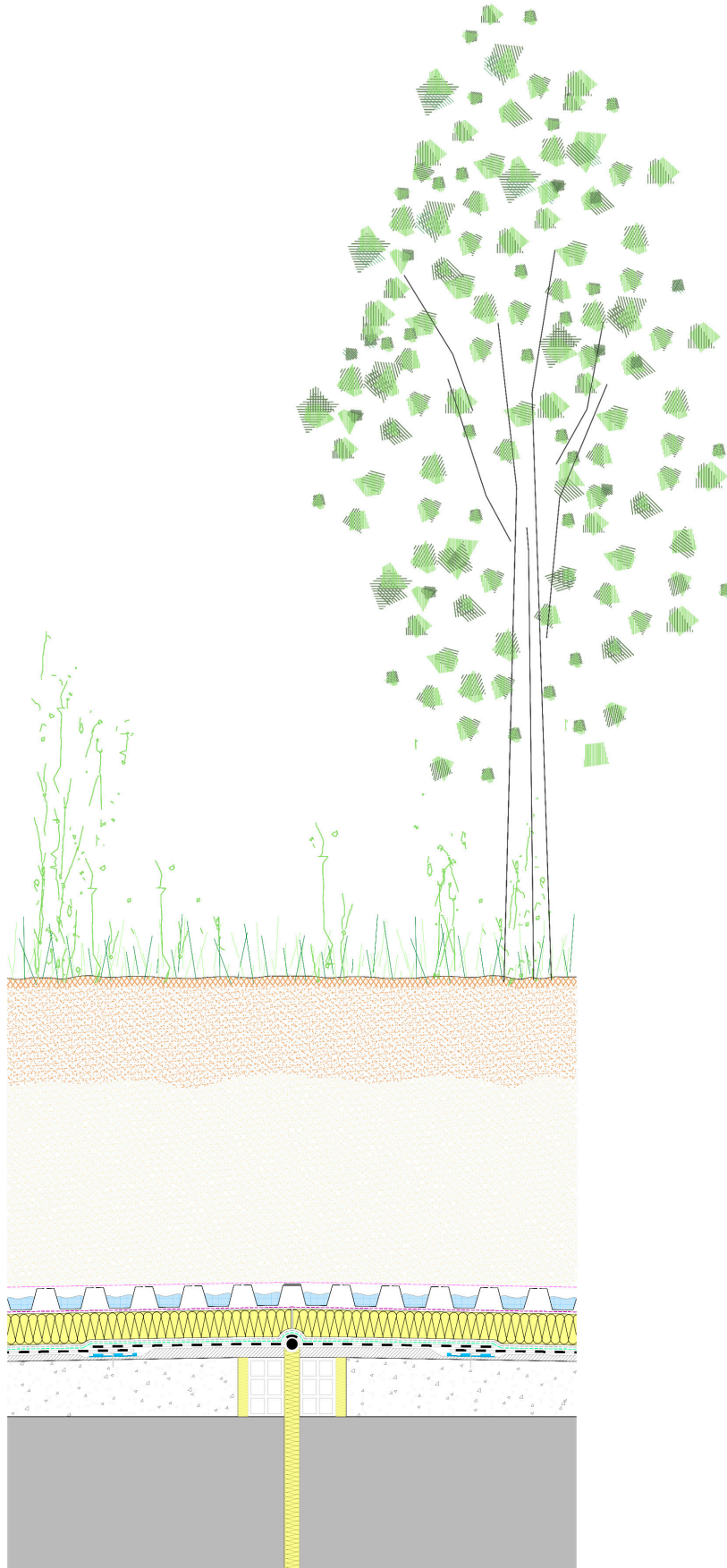


Figura 4.49. Junta de dilatación estructural en cubierta ajardinada intensiva invertida.





#### 4.2.9 Zonas transitables y pavimentadas

Estas zonas van destinadas al paso de peatones, por lo que deben diseñarse con pendientes entre el 1 % y el 5 %<sup>349</sup>. Siguen la misma normativa mencionada previamente: la sección 1 del CTE DB-HS 1<sup>350</sup> y la norma UNE 104416<sup>351</sup>. Las zonas pavimentadas se combinan con las zonas ajardinadas, tratando de asegurar la continuidad de la capa drenante y la lámina filtrante bajo ambas zonas (Figura 4.50 y 4.53). De acuerdo con la FLL, el drenaje de las zonas transitables se puede realizar asegurando la continuidad de la capa drenante colocada en las zonas ajardinadas o mediante la formación de pendientes hacia puntos de desagües propios de la zona pavimentada (Figura 4.51 y 4.54), tanto si la circulación de agua se produce sobre el pavimento o por debajo (junta abierta)<sup>352</sup>. En este caso, se opta por mantener la capa drenante y filtrante continua ya que ello permite mayor libertad de diseño y alternancia entre zonas ajardinadas y transitables, al mismo tiempo que se aprovecha el agua, tan necesaria para la correcta supervivencia de la vegetación, recogida en las zonas pavimentadas (de junta abierta) y almacenada en la capa drenante. Los tipos de pavimento más adecuados, que permiten el paso de agua por sus juntas abiertas y/o la filtración de agua a través de ellos son:

- **Pavimento con junta abierta sobre plots** (Figura 4.50, 4.51 y 4.52). Piezas de pavimento, realizadas con materiales de cierta resistencia, apoyadas sobre soportes regulables en altura (o plots)<sup>353</sup>. El sistema de drenaje de la cubierta ajardinada puede mantenerse continuo bajo el pavimento flotante y con pendiente hacia los puntos de evacuación de agua conjunta de la cubierta ajardinada y la zona pavimentada, ya que entre las juntas del pavimento flotante se filtra el agua de lluvia<sup>354</sup>. En este caso, el sumidero puede quedar oculto bajo el pavimento, siendo accesible pero no visible<sup>355</sup>.



Figura 4.50. Cubierta con solado flotante no aislante sobre plots.

349 Paradela, M.L.S. 2020b.

350 Ministerio de Fomento. 2022b.

351 AENOR. 2009.

352 FLL. 2018.

353 Paradela, M.L.S. 2020b.

354 FLL. 2018.

355 Paradela, M.L.S. 2020b.



- |                                 |                             |
|---------------------------------|-----------------------------|
| 1 Pasatubos de PVC              | 7 Perfil colaminado         |
| 2 Soporte estructural           | 8 Lámina impermeable - EPDM |
| 3 Junta perimetral              | 9 Aislante térmico          |
| 4 Hormigón ligero de pendientes | 10 Plot regulable en altura |
| 5 Mortero de regulación         | 11 Pavimento flotante       |
| 6 Manguilla de desagüe          |                             |

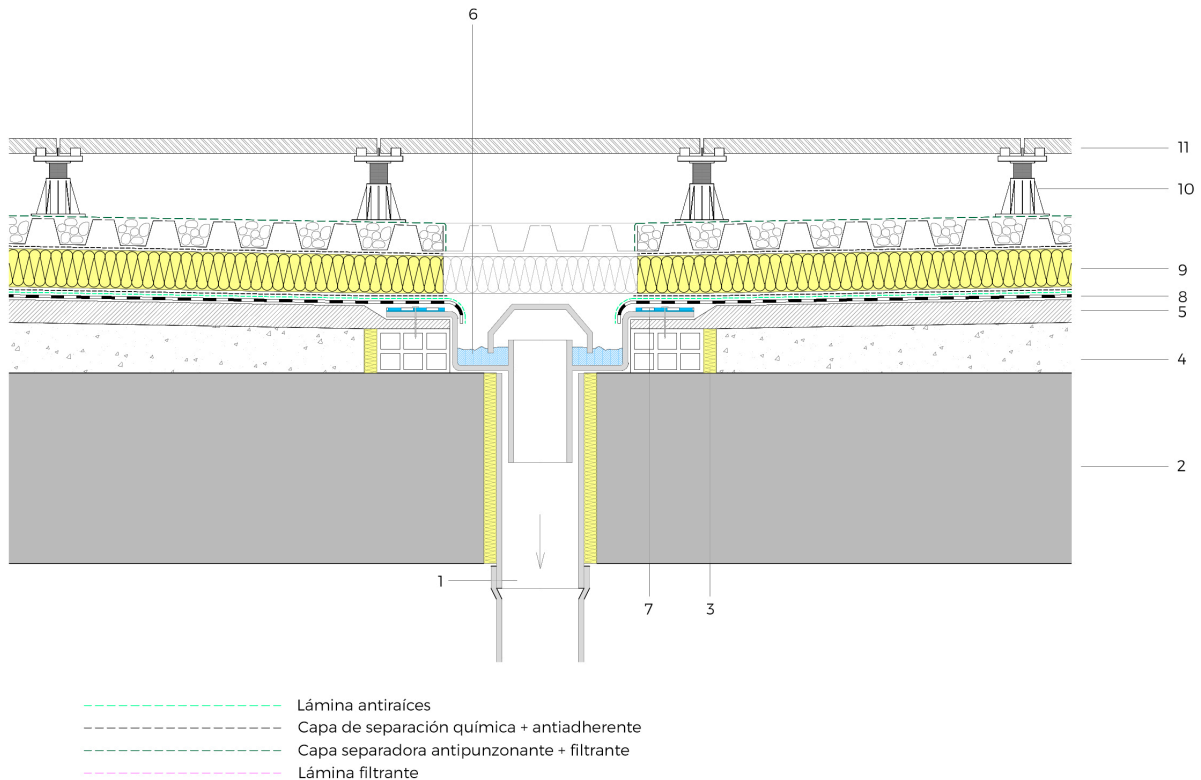


Figura 4.51. Sumidero en zona con pavimento flotante en cubierta invertida, con continuidad de capa drenante y lámina filtrante.

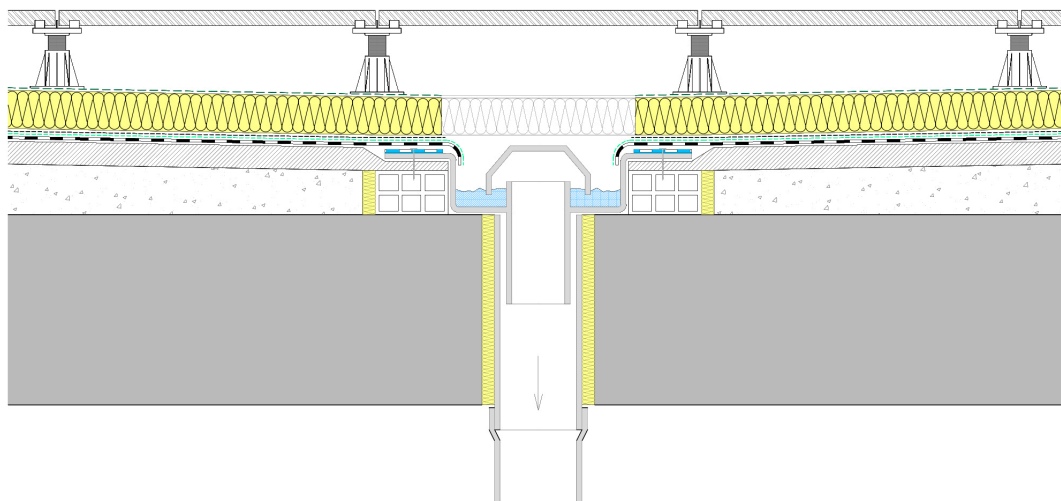


Figura 4.52. Sumidero en zona con pavimento flotante en cubierta invertida, sin continuidad de capa drenante y lámina filtrante.



- **Pavimento con solado aislante** (Figura 4.53, 4.54 y 4.55). En este caso el pavimento se compone de losas filtrantes y se puede colocar sobre plots o no. Las losas están constituidas por una base de poliestireno extruido (que puede ser de diferentes espesores) y una capa de hormigón poroso de alta resistencia como acabado superior<sup>356</sup>. Se pueden disponer directamente sobre la lámina impermeable, intercalando una capa separadora por incompatibilidad química y/o antiadherencia, sobre la lámina drenante continua de la cubierta ajardinada o sobre plots regulables en altura<sup>357</sup>. Este tipo de pavimento incluye ya el aislamiento de la cubierta<sup>358</sup>, configurando una cubierta invertida, y puede servir, cuando se coloca sobre plots, como base de apoyo del substrato y la vegetación en el caso de cubiertas aljibe con ajardinamiento (*polder roof*, véase apartado 4.5.3). Cabe destacar que, a pesar de tratarse de una cubierta invertida, no se dispone lámina difusora de vapor, ya que este acabado se coloca con junta abierta. En este caso, al igual que para el pavimento con junta abierta sobre plots, el vapor de agua que se puede acumular sobre el aislante (cara fría), ya que se disipa por las juntas abiertas.

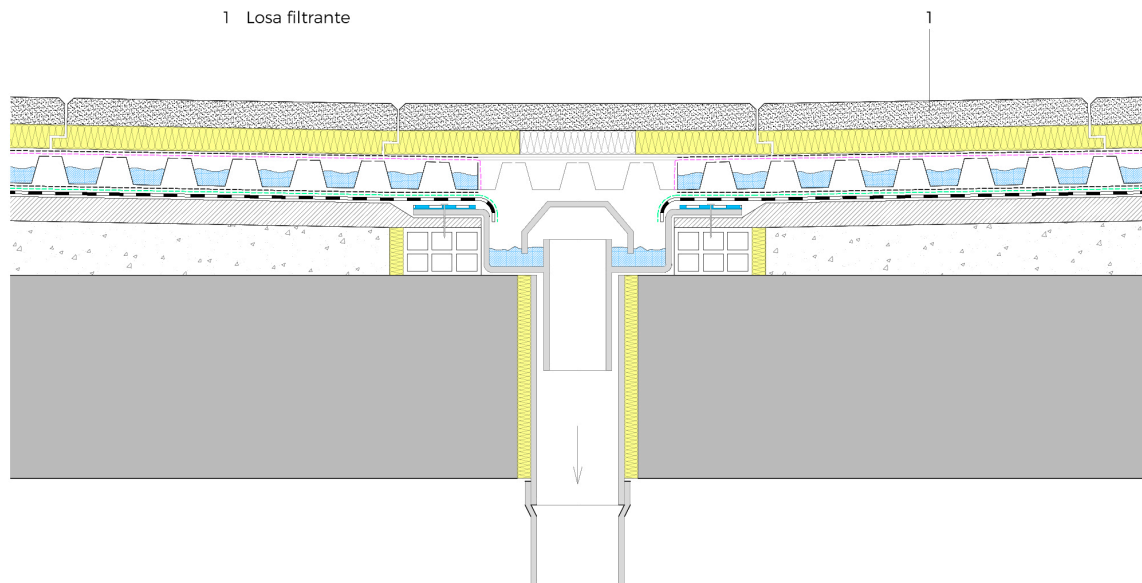


Figura 4.53. Sumidero en zona con losa filtrante en cubierta invertida, con continuidad de capa drenante y lámina filtrante.

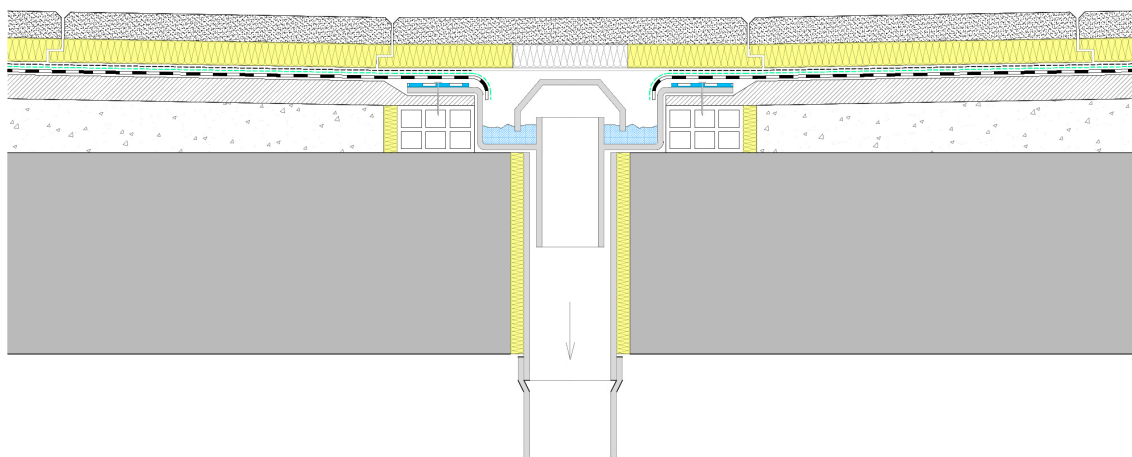


Figura 4.54. Sumidero en zona con losa filtrante en cubierta invertida, sin continuidad de capa drenante y lámina filtrante.

356 Paradela, M.L.S. 2020b.

357 FLL. 2018; Paradela, M.L.S. 2020b.

358 Paradela, M.L.S. 2020b.

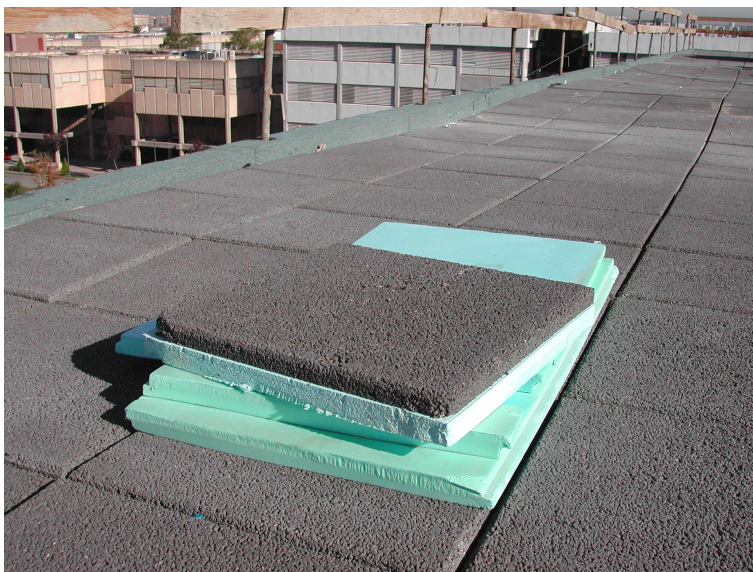


Figura 4.55. Cubierta con losa filtrante.

En el caso de que se coloquen en las cubiertas intensivas elementos de mobiliario se debe prestar especial atención a que sean estables, con carga distribuida y, si es necesario, estén anclados, evitando en este caso la rotura de la lámina impermeable, antiraíces y el aislamiento. Estos elementos de anclaje, por lo tanto, se deben pensar y prever desde las primeras fases del diseño y la ejecución<sup>359</sup>.

#### 4.2.10 Zonas no transitables y sin vegetación

Se trata de aquellas zonas de las cubiertas ajardinadas no transitables que se disponen sin vegetación por diferentes motivos, entre ellos la protección contra el fuego o para evitar que la vegetación y sus raíces obstruyan los puntos de desagüe. En general es recomendable dejar una franja de grava, o de baldosas con junta abierta (acabado pesado), de entre 30 y 50 cm de ancho como mínimo, desde el peto perimetral de la cubierta hacia el interior, al igual que alrededor de puntos como los sumideros<sup>360</sup> (Figura 4.56). Las funciones principales de estas franjas sin vegetación son posibilitar el acceso para mantenimiento, la aireación/respiración de las raíces, la evaporación del agua sobrante de la cubierta, ejecutar trabajos de limpieza de superficies como fachadas o medianera, el control de máquinas de instalaciones o placas solares, la protección contra el fuego, etc.<sup>361</sup>

En zonas especialmente sometidas a tensiones producidas por el viento (cumbreras, esquinas y bordes) se recomienda sustituir la vegetación, que podría ser arrastrada por el fuerte viento, por un acabado con un material pesado, como gravas o baldosas<sup>362</sup> (Figura 4.57). Los problemas relacionados con las tensiones debido al viento generan problemas importantes, especialmente en cubiertas invertidas y en aquellas con altura de cornisa mayor a 20 metros<sup>363</sup>.

Las zonas no transitables y sin vegetación se ejecutarán generalmente con una protección de grava, y en franjas de entre 30-50 cm<sup>364</sup>. En ambos casos, se sigue la misma normativa mencionada previamente: la sección 1 el CTE DB-HS<sup>365</sup> y la norma UNE 104416<sup>366</sup>.

359 FLL. 2018.

360 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

361 FLL. 2018.

362 Ibídem.

363 Zimmermann, A. 2015.

364 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

365 Ministerio de Fomento. 2022b.

366 AENOR. 2009.



- **Con protección pesada de grava.** En cubiertas planas, con pendientes entre el 1 % y el 5 %, se configura una capa de acabado de la cubierta, con espesor igual o superior a 5 cm, en base a cantos rodados sueltos, y con diámetro entre 16-32 mm<sup>367</sup>. En estos casos, si bajo la capa de grava se coloca un aislante térmico (normalmente XPS) este poseerá una resistencia mínima a la compresión de 300 kPa y se colocará una capa separadora antipunzonante entre la grava y el aislante<sup>368</sup>. En el caso de colocar grava entorno al sumidero este se deberá proteger con un paragravillas<sup>369</sup> (Figura 4.58).

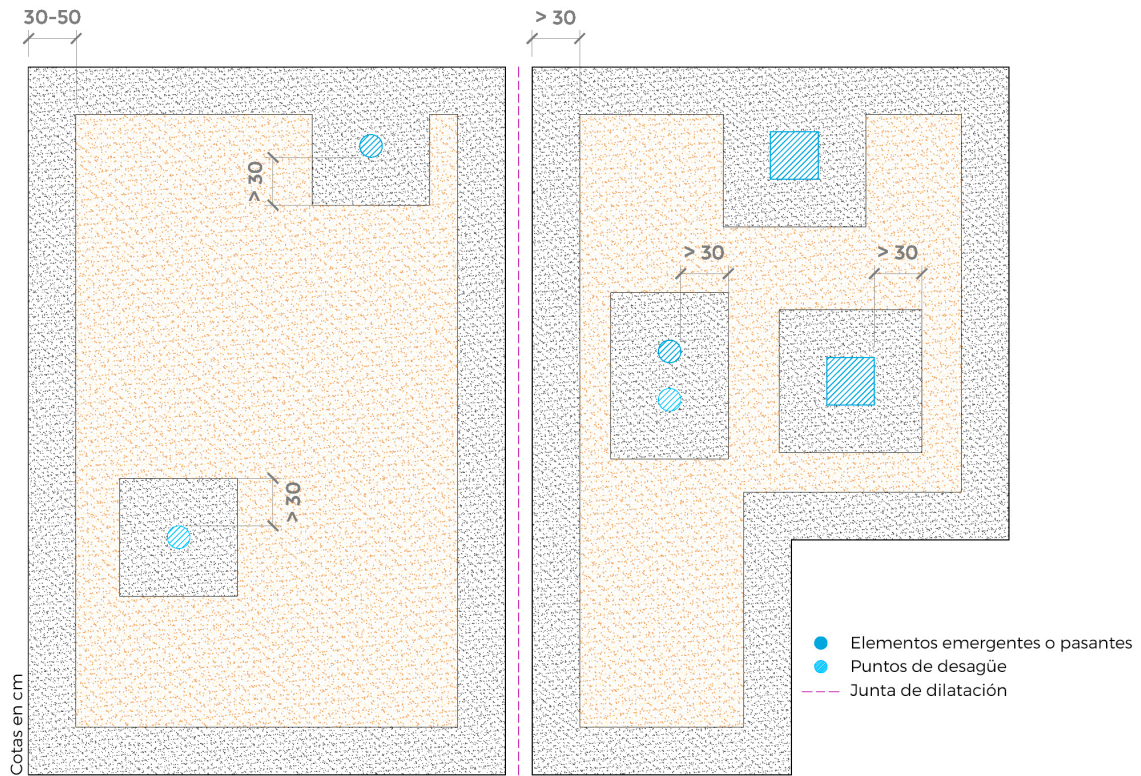


Figura 4.56. Zonas de protección sin vegetación.

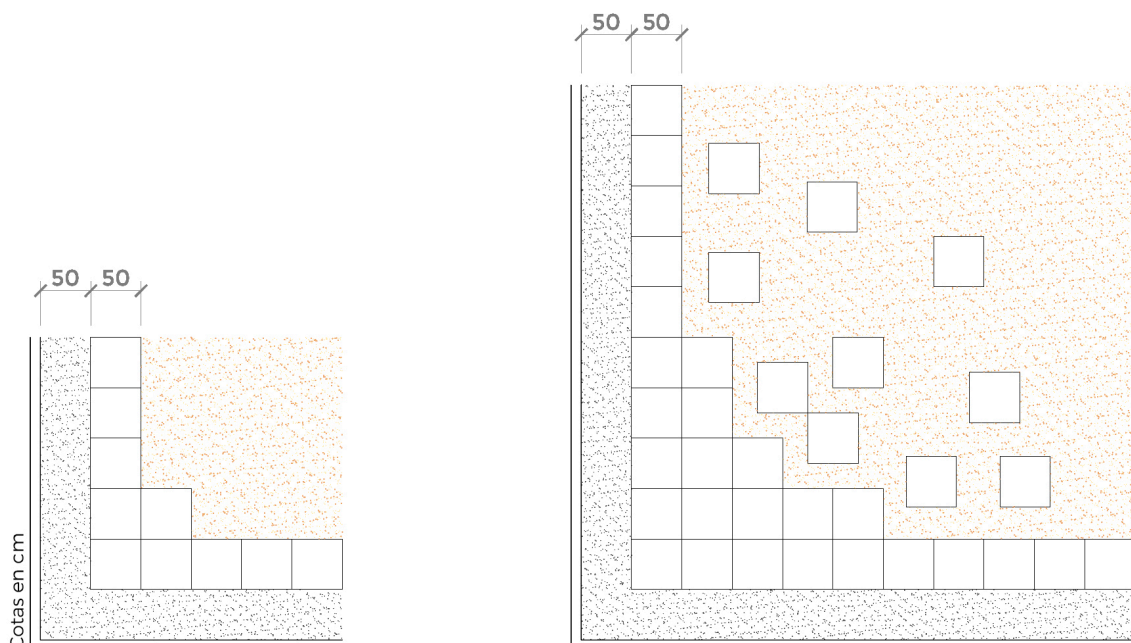


Figura 4.57. Ejemplos de combinación de grava con baldosas, en el perímetro de una cubierta.

367 Mas, Á. 2020; Paradela, M.L.S. 2020c.

368 Paradela, M.L.S. 2020c.

369 *Ibidem*.



*Figura 4.58. Zona de sumidero con paragravillas en cubierta de grava.*



### 4.3 MANTENIMIENTO

De acuerdo con la guía de la FLL, las principales fases del mantenimiento de cualquier cubierta ajardinada son<sup>370</sup> (Tabla 4.16):

- **Cuidados de finalización** (o de instalación<sup>371</sup>). Dedicados a preparar el sistema, instalando la vegetación en la cubierta y orientándola hacia un adecuado crecimiento.
- **Cuidados de desarrollo**. Centrados en conseguir unas condiciones funcionales, y de duración variable en función del tipo de vegetación y del emplazamiento. Se considera que estas condiciones se han alcanzado cuando la cobertura vegetal llega a valores del 90 %.
- **Cuidados de mantenimiento** (o de conservación<sup>372</sup>). Una vez logradas las condiciones funcionales, los cuidados se destinan a mantener estas condiciones, reparar imperfecciones o, simplemente, limpiar y cuidar el espacio.

FASES DE MANTENIMIENTO	DURACIÓN	OBJETIVOS
Cuidados de finalización (o instalación)	12 – 15 meses (Inspecciones quincenales en los 2 primeros meses y bimensuales en los meses siguiente)	Objetivo que alcanzar en esta fase: <ul style="list-style-type: none"><li>• Siembra: 60 % de las especies sembradas identificables/40 % de la superficie cubierta.</li><li>• Dispersión: 75 % de los brotes desarrollados/ 60 % de la superficie cubierta.</li><li>• Tepes o mantas precultivadas: 80 % de la superficie cubierta.</li><li>• Tepes o mantas de césped: 95 % de la superficie cubierta.</li></ul>
Cuidados de desarrollo	Aprox. 2 años	Objetivo que alcanzar en esta fase: una cobertura del 80 % de la superficie. Tareas que ejecutar: <ul style="list-style-type: none"><li>• Suministrar nutrientes (fertilización).</li><li>• Recortar y mantener despejadas las bandas sin vegetación.</li><li>• Eliminar las malas hierbas.</li><li>• Replantar y/o regar en caso de necesidad.</li></ul>
Cuidados de mantenimiento (o conservación)		<ul style="list-style-type: none"><li>• Mantener los cuidados.</li><li>• Mantener la vegetación lograda como objetivo.</li><li>• Aplicar tareas de la fase de desarrollo.</li></ul>

Tabla 4.16. Fases del mantenimiento.

Las cubiertas ajardinadas amplían la vida de la cubierta del edificio, aunque los cuidados de mantenimiento suelen ser más costosos y duraderos (debido a la ampliación de la vida útil y a la periodicidad de los cuidados, especialmente en cubiertas intensivas)<sup>373</sup>. Cabe destacar que, en el caso de cubiertas extensivas, si están bien ejecutadas, los cuidados de mantenimiento son mínimos, por lo que sí que se aprecia una reducción en la intensidad y los costes de mantenimiento<sup>374</sup>. Respecto al aumento de la vida útil, varias investigaciones lo corroboran, como Kosareo y Ries<sup>375</sup> que destacaron tras sus análisis sobre una cubierta ajardinada en Pittsburg (Estados Unidos) que la cubierta extensiva era capaz de ampliar la vida de la cubierta en 25 años, doblando, aproximadamente, la vida útil de una cubierta tradicional. Peri *et al.*<sup>376</sup>, a través de un análisis de la literatura existente, establecieron una esperanza de vida de aproximadamente 40 años para cubiertas extensivas.

370 FLL. 2018.

371 Zimmermann, A. 2015.

372 *Ibidem*.

373 Shin, E., Kim, H. 2019.

374 Van der Meulen, S.H. 2019.

375 Kosareo, L., Ries, R. 2007.

376 Peri, G., Traverso, M., Finkbeiner, M., *et al.* 2012.



La periodicidad de los principales cuidados de mantenimiento (o conservación) en una cubierta plana ajardinada es la siguiente<sup>377</sup>:

- **Semanalmente:** limpieza general de la cubierta, en el caso de que sea transitable.
- **Cada tres meses:** sustitución de plantas en mal estado y control de enfermedades; limpieza y revisión de la red de evacuación de agua, del sistema de riego, la iluminación y otras instalaciones como antenas, aparatos de climatización, etc.
- **Cada seis meses:** fertilización; revisión visual para asegurarse de que todos los elementos constructivos están en buen estado y realizar las reparaciones que pudieran ser necesarias; eliminar restos de nieve y/o hielo que puedan obstruir la evacuación de la ventilación en cubierta; limpieza del mobiliario, si lo hubiera, revisión de las fijaciones y aplicación de tratamientos anticorrosivos.
- **Una vez al año:** poda y recorte de plantas, eliminación de vegetación no deseada y escarificado del sustrato de césped, en el caso de que fuera necesario; limpieza general de la cubierta, en el caso de que no sea accesible; observación de posibles formaciones de humedades en la cubierta y en el interior del edificio; comprobar que no existan retenciones de agua en la superficie de la cubierta y que la red de evacuación no esté obstruida.
- **Cada diez años:** evaluar el estado de la lámina impermeable y en caso de ser necesario, sustituirla; renovar el sistema de protección antiraíces y sustituir el sistema de drenaje; renovar el sellado de las juntas de dilatación.
- **Cada veinte años:** inspección técnica con una comprobación general del estado y el funcionamiento de la cubierta, centrándose en la impermeabilización, la red de evacuación de agua y los puntos singulares, entre otros.

Un correcto mantenimiento puede evitar, también, que se produzcan incendios, como por ejemplo retirando las plantas muertas, regando periódicamente, manteniendo las franjas sin vegetación libres de ella o evitando los métodos de calor en la eliminación de la vegetación no deseada<sup>378</sup>.

De todos los elementos mencionados, el principal factor que incrementa el mantenimiento en las cubiertas ajardinadas respecto al mantenimiento de una cubierta tradicional es el crecimiento de las malas hierbas<sup>379</sup>. Partiendo de esta preocupación, Nagase *et al.*<sup>380</sup> sugieren tres métodos para evitar el crecimiento de malas hierbas: evitar la llegada de luz a la capa superior del sustrato (mediante el uso de plantas que tengan una cobertura del 100 % o que sean altas y de follaje denso), usar gran variedad de plantas (aumentar la biodiversidad) y eliminar posible vegetación existente previa a la plantación y que pueda producir germinación. En los experimentos que llevaron a cabo en una cubierta semiintensiva en Rotterdam (Países Bajos) se determinó que usar una capa superior de sustrato de gravilla (mínimo 2,5 cm de espesor) también limitaba el crecimiento de las malas hierbas, y que, con eliminar las malas hierbas unas seis veces por año, se conseguía una efectiva reducción del número de este tipo de plantas colonizadoras durante el periodo de desarrollo.

377 Ajuntament de Barcelona. 2015; IVE. 2022a.

378 FLL. 2018.

379 Vijayaraghavan, K. 2016.

380 Nagase, A., Dunnett, N., Choi, M.-S. 2013.





## 4.4 OTROS EJEMPLOS DE ARQUITECTURA SOSTENIBLE

### 4.4.1 Earthship

Otro ejemplo de arquitectura sostenible, que destaca por la concepción del propio proyecto como herramienta de ahorro energético y mejora medioambiental, es el *Earthship* (Figura 4.59). Este concepto fue acuñado y puesto en práctica por Michael Reynolds con la intención de construir una vivienda empleando materiales reciclados al alcance de cualquier persona: ruedas de coche, latas, botellas de plástico o vidrio, arena y tierra, entre otros<sup>381</sup>. Se trata, en esencia, de un modelo autónomo de vivienda protegida por tierra, ya que suelen construirse parcialmente en el subsuelo para aprovechar la inercia térmica de este; que emplea principios de las técnicas solares pasivas y que defiende la producción *in situ* de comida y el uso de agua de lluvia captada<sup>382</sup>.



Figura 4.59. Vivienda Earthship en Gamerco, Nuevo México (Estados Unidos).

La estructura básica de este tipo de construcciones se basa en la construcción, en tres de los lados, de muros de retención con ruedas recicladas de vehículos rellenas de tierra, pudiendo disponer o no una capa de aislamiento embebido en el terraplén y a poca distancia del muro de ruedas para mantener cerca de la vivienda el calor almacenado en la masa térmica (Figura 4.60); el cuarto lado, que se sitúa en la orientación soleada, se acristala para aportar calor y luz natural al interior (Figura 4.61)<sup>383</sup>. La intención es que estos edificios, aparte de mantener por medios pasivos un ambiente interior confortable, sean capaces de producir su propia electricidad, recolectar el agua que necesiten y gestionar sus desperdicios<sup>384</sup>. Reynolds defendía el *Earthship* como una opción sostenible y climáticamente funcional que podía implantarse con éxito en cualquier clima, con un presupuesto bajo y con una forma que se podía adaptar sin modificar las premisas de diseño básicas<sup>385</sup>.

Kruis y Heun<sup>386</sup> estudiaron la viabilidad del *Earthship* en términos de confort térmico, generación eléctrica y abastecimiento de agua en diferentes zonas climáticas (continental subártico: Anchorage, Alaska; húmedo continental: Grand Rapids, Michigan, Estados Unidos; seco/árido: Albuquerque, Nuevo México, Estados Unidos; y tropical húmedo/seco: Honolulu, Hawái, Estados Unidos) para comprobar si el ideal de Reynolds era realmente aplicable. El comportamiento térmico se modeló con el programa EnergyPlus, determinando el rango de confort interior para temperaturas entre 21-28 °C, mientras que el modelo financiero comparaba los costes y beneficios durante la construcción y operación de la vivienda, considerando una vida útil de 45 años (aunque, de nuevo, hay beneficios que no se pueden cuantificar económicamente, como el beneficio ambiental relacionado con el empleo de materiales reutilizados como las ruedas de vehículos).

Las conclusiones obtenidas reflejan que el sistema *Earthship*, sin calefacción, no se puede considerar confortable en invierno en los climas continental subártico y húmedo continental, aunque admiten que el

381 Krzemińska, A., Zaręba, A., Dzikowska, A. 2017.

382 Freney, M., Soebarto, V., Williamson, T. 2013; Krzemińska, A., Zaręba, A., Dzikowska, A. 2017.

383 Kruis, N.J., Heun, M.K. 2007.

384 *Ibidem*.

385 Krzemińska, A., Zaręba, A., Dzikowska, A. 2017.

386 Kruis, N.J., Heun, M.K. 2007.



diseño en sí mismo sí que es capaz de reducir la dependencia de la calefacción. Respecto a la recolección de agua, en la mayoría de los climas no se producen precipitaciones suficientes para suplir las demandas interiores de la vivienda, al igual que la poca competitividad económica de los sistemas de placas fotovoltaicas tampoco ayudan a la viabilidad del *Earthship*. Por lo tanto, desde el punto de vista económico, su coste inicial es mucho mayor que el de una vivienda convencional, por lo que Kruis y Heun<sup>387</sup> concluyeron que en los climas donde no aporta un elevado ahorro energético (como es el caso del clima tropical), no se considera una opción viable económicamente, ni siquiera a largo plazo.



Figura 4.60. Muro de contención con ruedas de vehículo en desuso.



Figura 4.61. Vivienda *Earthship* en Taos, Nuevo México (Estados Unidos).

Freney *et al.*<sup>388</sup> estudiaron el comportamiento térmico del sistema *Earthship* en una vivienda existente en Taos (Nuevo México, Estados Unidos), comprobando después mediante modelos energéticos en el programa EnergyPlus su funcionalidad en otros climas (marino templado: París, Francia; árido/semiárido: Albacete, España; mediterráneo de climas templados: Sevilla, España; mediterráneo de climas cálidos: Valladolid, España; y marino costero oeste: Londres, Reino Unido). En los datos tomados en Taos la temperatura interior se encuentra por debajo de la temperatura de confort solo en las primeras horas de la mañana (entre las 6:00-8:00 h), mientras que en los climas árido/semiárido y mediterráneos (tanto templado como cálido) se consiguen las condiciones de confort durante todo el año. En los climas marino costero oeste y marino templado la temperatura interior está por debajo de los límites de confort durante el invierno, mientras que en verano la mínima media sí que se encuentra dentro de los límites de confort. Aun así, al igual que comentaron Kruis y Heun, Freney *et al.*<sup>389</sup> concluyeron que la energía de refrigeración y calefacción para alcanzar los valores de confort térmico interior en una vivienda *Earthship* sí que se ve reducida, aunque no eliminada. Tan solo se requiere energía de refrigeración en el clima árido/semiárido, con 0,9 kWh/m<sup>2</sup>año, mientras que respecto a la energía de calefacción esta es necesaria en los climas marino costero oeste y marino templado en los meses fríos (14,3 kWh/m<sup>2</sup>año y 12,6 kWh/m<sup>2</sup>año, respectivamente). Si recordamos el estándar *Passivhaus*, este limitaba a un máximo de 15 kWh/m<sup>2</sup> por año el uso de energía en calefacción, e igualmente en enfriamiento, por lo que se puede concluir que la vivienda *Earthship* no es capaz de conseguir la autonomía completa y las condiciones de confort interior solo con medidas pasivas en cualquier clima, pero sí que se podría considerar que es, en cualquier emplazamiento, sostenible y susceptible de recibir el certificado *Passivhaus*.

387 Kruis, N.J., Heun, M.K. 2007.

388 Freney, M., Soebarto, V., Williamson, T. 2013.

389 *Ibidem*.



#### 4.4.2 Materiales PCM

Los materiales PCM (del inglés *Phase Change Materials*) son aquellos que absorben calor y lo transmiten solo durante el cambio de estado sólido-líquido, y viceversa, manteniendo una temperatura más o menos constante gracias al calor latente del material<sup>390</sup>. El PCM es capaz de almacenar calor latente (debido a la radiación solar y la temperatura ambiente) hasta llegar a su temperatura de fusión, en ese momento, cuando se licua completamente, es cuando libera el calor almacenado. Su introducción en el mundo de la construcción es bastante reciente, y se orienta hacia el aumento de la resistencia térmica de la envolvente del edificio, ayudando a disminuir las oscilaciones térmicas gracias a su temperatura casi constante, mejorando el confort en el interior de los edificios. La disposición de una capa de material PCM en la piel del edificio puede disminuir la magnitud del flujo de calor a través de la envolvente, especialmente si se escoge adecuadamente la temperatura de fusión. Diversos estudios numéricos han demostrado, tras el análisis unidimensional del flujo de calor, que la posición más efectiva de la capa de PCM es cuanto más al exterior mejor y con mayores temperaturas de fusión<sup>391</sup>.

Shao *et al.*<sup>392</sup> en sus investigaciones sobre el uso de materiales PCM, determinaron que el consumo de energía debido al flujo de calor por la cubierta se podía reducir en un 50-60 % empleando 30 cm de material aislante convencional, en comparación con la inexistencia de una capa aislante. En cambio, si se empleaba una capa de materiales PCM, de igual espesor y temperatura de fusión 31 °C (temperatura óptima de fusión, desde el punto de vista del consumo energético), el ahorro energético mejoraba en un 20 % respecto a la cubierta con materiales aislantes convencionales, es decir, se reducía el consumo energético entre un 70-80 % respecto a la cubierta sin aislamiento. Esto se debe a que, en el caso de una capa de material aislante convencional, la superficie interior de este va ascendiendo de temperatura poco a poco, a lo largo del tiempo, lo que implica un mayor consumo energético respecto al ascenso puntual de temperatura que produce el PCM al fundirse o solidificarse completamente.

La temperatura de fusión también determina el porcentaje de PCM que se solidificará por la noche, cuando bajen las temperaturas y desaparezca la radiación solar, esto puede suponer un problema porque una solidificación demasiado rápida implica los mismos problemas de liberación de calor que una fusión demasiado rápida<sup>393</sup>.

Otra diferencia a tener en cuenta entre los materiales aislantes convencionales y los PCM es la relación del ahorro energético con el espesor. En un material aislante convencional la relación entre el espesor y el ahorro energético es casi lineal, ya que un aumento del espesor implica un aumento de la resistencia térmica, pero en el caso de los PCM el ahorro energético disminuye con el espesor, y las variaciones de ahorro son despreciables para espesores altos, debido a que a mayor espesor más tarda en fundirse todo el material, pero por la noche, con temperaturas cercanas a la solidificación, se invierte el comportamiento y el consumo energético puede llegar a ser mucho mayor que el ahorro conseguido durante el día. Para espesores menores o iguales a 4,5 cm la alternativa con PCM es mejor energéticamente que los materiales convencionales, debido al calor latente que puede almacenar, mientras que para espesores mayores a 5 cm los materiales convencionales funcionan mejor<sup>394</sup>.

Shao *et al.*<sup>395</sup> también detectaron que, durante los periodos fríos, la capa de material PCM no tenía la capacidad de modificar su temperatura de cambio mediante el calor latente (ya que en el exterior hacía más frío), por lo que funcionaba de igual forma que una capa con material aislante convencional. Cabría estudiar el comportamiento de los materiales PCM en el clima mediterráneo donde los inviernos no son excesivamente fríos, más bien templados y con intensa radiación solar.

390 Shao, B., Du, X., Ren, Q. 2018.

391 *Ibidem*.

392 *Ibidem*.

393 *Ibidem*.

394 *Ibidem*.

395 *Ibidem*.



#### 4.4.3 Fachadas vegetales

Las fachadas y muros vegetales configuran una estrategia de la arquitectura sostenible que, al igual que las cubiertas ajardinadas, mejoran el comportamiento térmico y energético de los edificios y el entorno urbano mediante el uso de la vegetación. En este caso, el comportamiento térmico se verá influenciado por variables similares a las de la cubierta ajardinada, como son las características del edificio, el tipo de vegetación, el tipo de sustrato y el espesor de la capa vegetal, pero también por características propias de las fachadas, como por ejemplo la orientación<sup>396</sup>. Por lo tanto, el funcionamiento de las fachadas vegetales se asemeja mucho al de las cubiertas ajardinadas, basándose en mecanismos muy similares<sup>397</sup>:

- Intercepción de la radiación solar mediante la vegetación, funcionando como elemento de aporte de sombra al sustrato y el elemento constructivo.
- Enfriamiento del entorno cercano a la capa vegetal mediante el proceso de evapotranspiración de las plantas y el sustrato.
- Aislamiento en función de la transmitancia térmica de cada una de las capas, y de la capacidad aislante del aire entre ellas.
- Modificación del efecto del viento sobre la fachada en función del sistema vertical (relación entre vegetación y soporte).

Los beneficios microclimáticos y energéticos que pueden aportar las fachadas vegetales son, también, muy similares a los que puede provocar una cubierta ajardinada, como la ampliación de la vida de la fachada, el aumento del aislamiento térmico y la inercia en la envolvente, la protección de esta de la incidencia directa de la radiación solar, y la reducción de la absorción solar y de las fluctuaciones de temperatura<sup>398</sup>. Aun así, las fachadas vegetales son estéticamente más atractivas, porque pueden ser disfrutadas visualmente por los usuarios de la ciudad (las cubiertas ajardinadas, si no están sobre edificios de poca altura no se ven) y funcionan mejor en cuanto a la absorción de ruido urbano y control acústico, ya que se encuentran más cerca de la fuente del ruido. En cambio, no pueden funcionar como una zona verde de recreación apta para ser usada y disfrutada por los usuarios a modo de jardín.

La incidencia de las fachadas vegetales en el balance térmico de un viandante fue estudiada por Echave Martínez<sup>399</sup>, que determinó que las calles más sensibles al efecto de este sistema ajardinado vertical eran aquellas en las que la relación entre la altura de los edificios ( $h$ ) y la distancia entre fachadas enfrentadas ( $d$ ) era mayor a 2 ( $h/d > 2$ ), con mayor sensibilidad para aquellas calles con orientación norte-sur. En la franja horaria de mayor uso del espacio urbano (entre las 8 y las 22 horas) las fachadas vegetales podían ayudar a alcanzar las condiciones de confort térmico hasta en un 80 % del tiempo.

A la hora de instalar una fachada vegetal se deben tener en cuenta una serie de conceptos técnicos, como los aspectos constructivos propios de su diseño (puede configurarse como un sistema sujeto a la fachada existente o como una estructura autoportante independiente), el acceso a la red de suministro de agua, el método de drenaje, la accesibilidad para mantenimiento, las orientaciones predominantes (de gran influencia en la posterior elección de la vegetación) o la proximidad a otros elementos de la Infraestructura Verde, entre otros<sup>400</sup>. El sistema constructivo determinará también, a su vez, la elección de la vegetación, ya que, en sistemas sujetos a la fachada (sistemas directos), la vegetación crece en el suelo (Figura 4.62) o en macetas colocadas a diferentes alturas, subiendo verticalmente por la superficie de la fachada (raíces aéreas, tallos que se enrollan o superficies adhesivas)<sup>401</sup>. En cambio, en sistemas autoportantes (sistemas indirectos) la vegetación crece directamente en la estructura soporte (Figura 4.63), colocada a cierta distancia de la fachada o muro, por lo que suelen integrar sistemas de riego y fertilización propios<sup>402</sup>. Térmicamente, los sistemas autoportantes mejoran el comportamiento de la fachada vegetal, ya que introducen un hueco

396 Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. 2018.

397 Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., *et al.* 2014.

398 Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. 2018.

399 Martínez, C.E. 2006.

400 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

401 Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. 2018.

402 *Ibidem.*



entre el muro y el sistema vegetal (generalmente entre 3-15 cm) que actúa como colchón térmico<sup>403</sup>; su ejecución es más sencilla y sus requisitos de mantenimiento menores<sup>404</sup>.



Figura 4.62. Fachada vegetal con sistema directo.

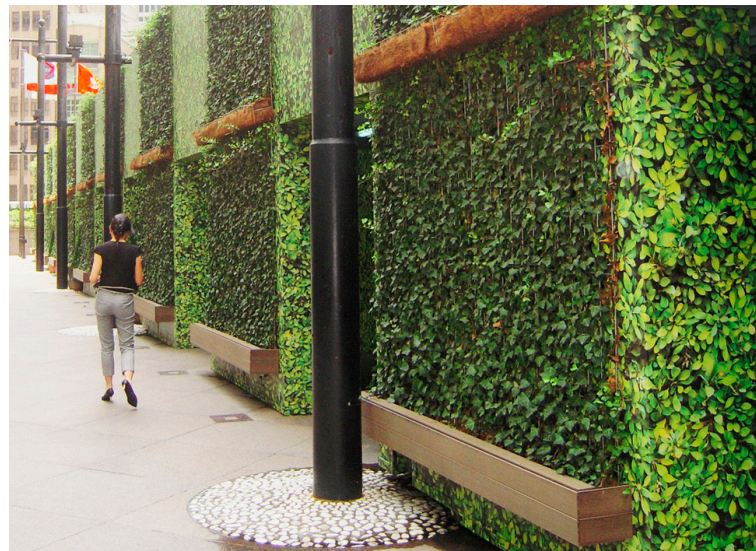


Figura 4.63. Fachada vegetal con sistema indirecto.

A su vez, el sistema autoportante puede clasificarse en continuo o modular: el primero se compone de pantallas ligeras y permeables donde la vegetación se inserta individualmente, mientras que el segundo se configura en base a elementos modulares, como bandejas, recipientes o bolsas flexibles, que incluyen sustrato donde la vegetación puede crecer, por lo que esta solución suele ser más pesada que la continua<sup>405</sup>. En general, sea cual sea el sistema empleado, las especies vegetales más empleada en fachadas vegetales con las plantas herbáceas perennifolias, vivaces y trepadoras<sup>406</sup>.

Respecto al comportamiento térmico y energético de las fachadas vegetales, Vox *et al.*<sup>407</sup> analizaron el efecto térmico, en Bari (Italia), de la instalación de una fachada vegetal autoportante en orientación sur, a 15 cm del muro original, y con sistema de riego por goteo, comparando su comportamiento con la misma fachada, pero sin el revestimiento vegetal. En un día típico, sin nubes, de verano, con una temperatura ambiente media de 27,6 °C, con una mínima de 15,7 °C y una máxima de 41,4 °C, la máxima temperatura en la fachada ajardinada se registró 1 hora más tarde que la máxima obtenida en la fachada tradicional. La

403 Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., *et al.* 2014.

404 Lesjak, V., Pajek, L., Košir, M. 2020.

405 Manso, M., Castro-Gomes, J. 2015.

406 Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.

407 Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. 2018.



presencia de vegetación también mitigó la temperatura externa de la envolvente, situándose entre 6-7 °C por debajo de la temperatura superficial del revestimiento tradicional. De acuerdo con las investigaciones de Lesjak *et al.*<sup>408</sup> en Punat (Croacia), el uso de una fachada vegetal autoportante con orientación sur, en un día representativo de verano soleado, puede reducir la temperatura máxima de la superficie de la fachada entre 7,5 °C y 12,3 °C respecto a la temperatura superficial de una fachada tradicional, retrasando el pico de temperatura en 3 horas. En el caso de un día de verano con lluvia, comprobaron que la vegetación impedía que el agua mojara directamente la superficie de la fachada, por lo que la temperatura superficial tras la estructura autoportante ajardinada era mayor que la temperatura superficial de la fachada tradicional sin vegetación, mientras duraba el evento lluvioso.

En cambio, durante la noche, Vox *et al.*<sup>409</sup> detectaron que la temperatura superficial exterior de la fachada vegetal era 2 °C mayor que en la fachada convencional, hecho en este caso no deseable ya que, en verano, por la noche, se debería producir un flujo de calor desde el interior del edificio hacia el exterior, más frío, para refrescar el ambiente interior. Igualmente, Lesjak *et al.*<sup>410</sup> también comprobaron que, durante la noche, la temperatura superficial tras la capa vegetal era de media 1,5 °C mayor que en la superficie de la fachada tradicional.

El poder aislante de la fachada vegetal (razón por la cual la temperatura es más baja durante el día y más alta durante la noche) depende en gran medida del LAI y el espesor de la capa de vegetación: a mayor LAI, mayor aislamiento<sup>411</sup>. Hoelscher *et al.*<sup>412</sup> determinaron, tras sus investigaciones en fachadas ajardinadas en Berlín (Alemania), que aquellos sistemas en los que el aire podía circular en el espacio entre el elemento ajardinado autoportante y la fachada (sistemas indirectos con cámara de aire ventilada) se reducía el efecto de aislamiento por la noche. De acuerdo con Campiotti *et al.*<sup>413</sup>, la temperatura de la cámara de aire entre la fachada y el elemento vegetal es más influenciado si se permite la ventilación natural en ella, mejorando el comportamiento como elemento enfriador en verano y aislante en invierno. Pérez *et al.*<sup>414</sup> comprobaron, en sus estudios en Lleida (España), que el aire de la cámara intermedia entre el ajardinamiento y la superficie exterior de la fachada alcanzaba mayor temperatura y menor humedad en periodos con menor LAI (invierno) y una menor temperatura y mayor humedad en los periodos con mayor LAI (verano). Vox *et al.*<sup>415</sup> concluyeron que se necesitaba alcanzar valores mínimos de intensidad de radiación solar de 200 W/m<sup>2</sup> para activar el comportamiento de enfriamiento efectivo en las fachadas ajardinadas, ya que, con valores inferiores, o por la noche con valores de 0 W/m<sup>2</sup>, predominaba el carácter aislante del sistema vegetal. Observaron que el poder de enfriamiento, una vez superada la frontera de los 200 W/m<sup>2</sup>, también se ve influenciado por la humedad relativa y la velocidad del viento: a menor humedad ambiente mayor enfriamiento, hecho que se puede relacionar con la capacidad de evapotranspiración de las plantas, y a mayor velocidad del viento mayor enfriamiento.

En invierno, Vox *et al.*<sup>416</sup> concluyeron que, tanto si se trataba de un día soleado (con intensa radiación solar directa) como si era un día nublado, la vegetación aumentaba el aislamiento de la fachada, especialmente en las primeras horas de la mañana, en las cuales la temperatura de la fachada vegetal siempre era entre 1 y 2 °C mayor que en la superficie del muro tradicional sin ajardinar.

Actualmente, la nueva hoja de ruta en el campo de las fachadas vegetales se centra en conseguir un mejor comportamiento térmico y energético, un aumento de su durabilidad mediante elementos de drenaje, una simplificación del proceso de montaje y mantenimiento y la adaptación a diferentes formas (como, por ejemplo, las superficies curvas)<sup>417</sup>.

408 Lesjak, V., Pajek, L., Košir, M. 2020.

409 Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. 2018.

410 Lesjak, V., Pajek, L., Košir, M. 2020.

411 Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., *et al.* 2016.

412 *Ibidem*.

413 Campiotti, C.A., Schettini, E., Alonzo, G., *et al.* 2013.

414 Pérez, G., Rincón, L., Vila, A., *et al.* 2011.

415 Vox, G., Blanco, I., Schettini, E. 2018.

416 *Ibidem*.

417 Manso, M., Castro-Gomes, J. 2015.



Uno de los caminos de innovación que se han tomado han sido respecto a los VGMS, del inglés *Vertical Greenery Modular System*. Serra *et al.*<sup>418</sup> desarrollaron este modelo en Turín (Italia), dentro del programa de investigación de la Unión Europea GRE\_EN\_S (*GREen ENvelope System*), consistente en una caja realizada con materiales reciclados y/o naturales, recubierta con vegetación y caracterizada por mostrar unos valores elevados de eficiencia energética y ambiental, a la vez que pretende ser un sistema modular, fácil de instalar, de mantener y factible a nivel económico.

Las investigaciones realizadas sobre el sistema VGMS avalaron que las viviendas estudiadas y revestidas con estos módulos presentaban menores pérdidas y ganancias de calor en el interior, consiguiendo que el sistema fuera eficiente térmicamente y que factores como el follaje de la vegetación o el tamaño de las plantas no afectara considerablemente a la conductividad térmica del sistema. De hecho, para conseguir un aislamiento similar al aportado por el VGMS, un muro tradicional necesitaría todavía mayor espesor de aislamiento: en el caso del estudio realizado en Turín, se necesitaban 5+3 cm de poliestireno extruido (XPS) con el VGMS, mientras que con un acabado de madera convencional se necesitaban 8+3 cm de XPS, por lo que el módulo de vegetación se estima que equivale a unos 3 cm de aislamiento XPS. En cuanto a la cuantificación del comportamiento térmico del sistema VGMS, Serra *et al.*<sup>419</sup> en el interior, la temperatura llegó a ser 4 °C menor con el sistema VGMS que con un revestimiento convencional de madera. Respecto a su comportamiento acústico, este era mejor cuando el substrato se encontraba húmedo, ya que se aumentaba su densidad y se mejoraba la absorción acústica, mientras que el tipo de hojas de la vegetación no afectaba de manera considerable a la absorción acústica del sistema. En los ensayos realizados por Serra *et al.* se obtuvieron mejoras de 3 dB en el aislamiento acústico de la fachada gracias el sistema VGMS, en comparación con el revestimiento de madera.

---

418 Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., *et al.* 2017.

419 *Ibíd.*



## 4.5 OTROS EJEMPLOS DE CUBIERTAS SOSTENIBLES

### 4.5.1 Cubierta ajardinada con paneles fotovoltaicos

Un beneficio energético indirecto de las cubiertas ajardinadas es su posibilidad de combinación con los paneles fotovoltaicos para configurar una cubierta todavía más sostenible<sup>420</sup> (Figura 4.64). La combinación de un sistema ajardinado con la instalación de paneles solares afecta de manera positiva al funcionamiento de ambos elementos: los paneles se enfrían con la presencia de la vegetación y mejoran su rendimiento, ya que por encima de los 25 °C lo reducen<sup>421</sup>, mientras que los paneles mejoran las condiciones de desarrollo y crecimiento de la vegetación, a la vez que aumentan la biodiversidad, resultando en una mayor variedad de plantas, de mayor tamaño y cobertura<sup>422</sup>. Por otro lado, la vegetación también puede absorber partículas del aire que de otra forma se podrían fijar en la superficie de los paneles fotovoltaicos y reducir su rendimiento<sup>423</sup>.

La cobertura vegetal, como ya hemos visto, tiene un poder de enfriamiento gracias a la evapotranspiración de la vegetación y el sustrato, consiguiendo que los paneles fotovoltaicos trabajen a temperaturas cercanas a los 25 °C, mientras que las cubiertas bituminosas tradicionales los suelen mantener, en verano, a unos 35 °C<sup>424</sup> (Figura 4.65). Esta disminución en torno a 10 °C implica un aumento del 0,25-0,5 % en el rendimiento de los paneles<sup>425</sup>. Chemisana y Lamnatou<sup>426</sup> estudiaron la combinación de paneles fotovoltaicos y cubierta ajardinada en el clima mediterráneo (Lleida, España), concluyendo un aumento en la producción de los paneles de un 1,29 % y 3,33 %, en función de la especie vegetal (*gazania rigens* y *sedum clavatum*, respectivamente), respecto a su instalación en una cubierta tradicional con acabado de grava. También comprobaron el efecto beneficioso de los paneles fotovoltaicos sobre la cubierta ajardinada, la superficie de la cual mostraba una temperatura un 17,8 % y un 26,1 % inferior (para *gazania* y *sedum*, respectivamente) que la temperatura de la cubierta tradicional con paneles fotovoltaicos y grava. Se plantea también la posibilidad de introducir riego en estas cubiertas combinadas, mejorando la evapotranspiración y, a la vez, mejorando la producción eléctrica de los paneles solares<sup>427</sup>.

A pesar de los mencionados beneficios, se debe prestar una especial atención a que no sea la vegetación la que arroje sombra sobre los paneles, por lo que se debe calcular la distancia entre la superficie del sustrato y el borde inferior de las placas fotovoltaicas, en función de la altura de la vegetación<sup>428</sup>. Como valores de referencia, en una cubierta extensiva de bajo crecimiento, esta distancia debería ser igual o superior a 20 cm<sup>429</sup>. Además, hay que considerar que, debido a la geometría de los paneles, se producirán zonas del sustrato más secas, donde los paneles impiden que llegue el agua de lluvia, y otras zonas mucho más húmedas a las que los paneles dirigen el agua que cae sobre ellos<sup>430</sup>. Otro factor que se debe tener en cuenta en el diseño de estas cubiertas es el anclaje de los paneles fotovoltaicos, que pueden ser con o sin penetración<sup>431</sup>. En el caso de que se coloquen sin penetración, el peso del conjunto de la cubierta ajardinada puede servir como lastre (considerando en este caso los pesos secos, no saturados, de las diferentes capas, para quedar del lado de la seguridad<sup>432</sup>). También se deben tener en cuenta los empujes del viento y la carga que soporta la estructura<sup>433</sup> (Figura 4.66).

420 Cascone, S. 2019; Van der Meulen, S.H. 2019.

421 Ajuntament de Barcelona. 2015.

422 Cascone, S. 2019.

423 Cruz, A.I. 2017.

424 Van der Meulen, S.H. 2019; Vijayaraghavan, K. 2016.

425 Van der Meulen, S.H. 2019.

426 Chemisana, D., Lamnatou, C. 2014.

427 Cascone, S. 2019.

428 FLL. 2018.

429 Ibídem.

430 Ibídem.

431 Ibídem.

432 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

433 FLL. 2018.





Figura 4.64. Cubierta ajardinada con paneles fotovoltaicos.

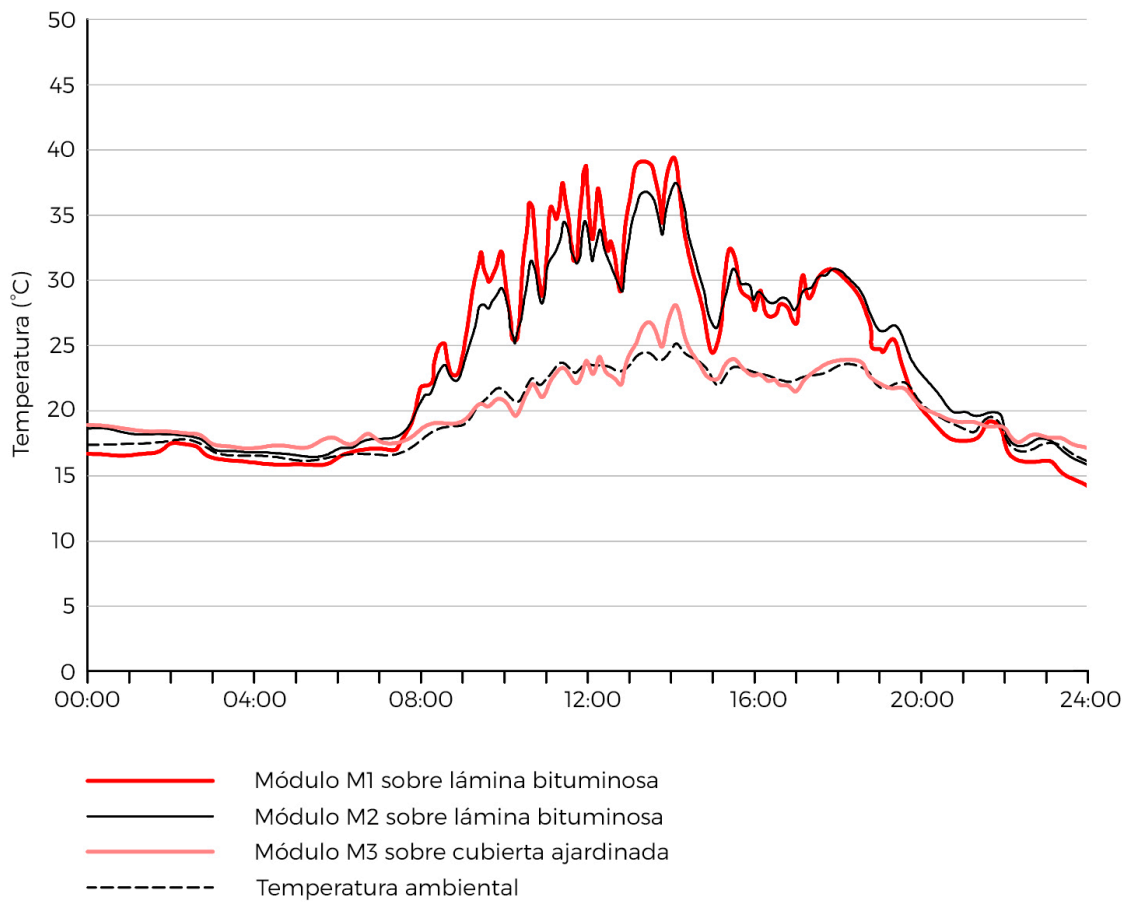


Figura 4.65. Temperaturas registradas en diferentes módulos fotovoltaicos en un día del mes de julio.

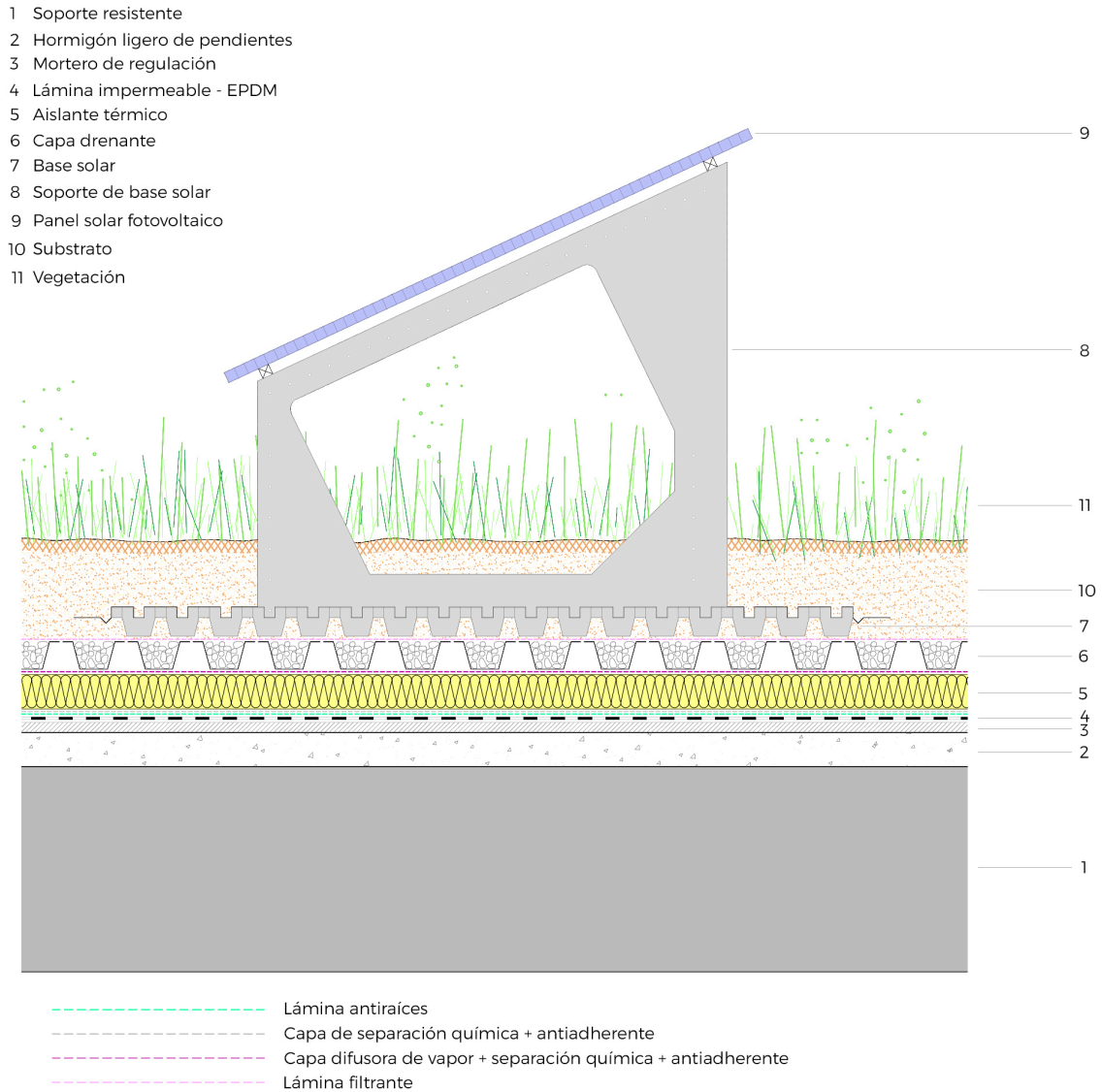


Figura 4.66. Cubierta ajardinada extensiva con sistema de anclaje de paneles fotovoltaicos lastrado (sin penetración).

#### 4.5.2 Cubierta aljibe

Este tipo de cubiertas disponen de una capa de almacenamiento de agua en la superficie de la cubierta, que puede estar cubierta o no, y que aporta beneficios térmicos y energéticos, a la vez que mejora el comportamiento y la durabilidad de la lámina impermeable, gracias a que esta se encuentra dentro de un medio acuoso<sup>434</sup>. También permite almacenar agua de lluvia, como en el caso de las cubiertas aljibe instaladas en los medios rurales de muchos países árabes para aprovechar las escasas precipitaciones que reciben<sup>435</sup>. Este tipo de cubiertas se configuran con una lámina de agua (de altura igual o mayor a 10 cm) en su superficie que garantiza la constante humectación de la lámina impermeable, ayudando a mantener las características funcionales de esta durante más tiempo<sup>436</sup>. Las principales ventajas de este sistema son el almacenamiento de calor en la capa de agua, la atenuación de la temperatura debido a la alta masa térmica del agua, el desfase de la onda térmica y el enfriamiento debido a la evaporación del agua<sup>437</sup>. También cabe destacar la mejor reflectancia de la superficie de agua, respecto a la radiación solar incidente, en comparación con una cubierta tradicional bituminosa o con revestimiento de solado fijo o grava, y el almacenamiento de agua de

434 Paradela, M.L.S. 2020d.

435 Campo, C.G. 2004.

436 Paradela, M.L.S. 2020d.

437 Yang, W., Wang, Z., Zhao, X. 2015.



lluvia para futuros usos en el edificio, aunque este último beneficio es más evidente en climas donde las lluvias son un fenómeno climatológico común y regular<sup>438</sup>.

En la normativa española (CTE) no se mencionan este tipo de cubiertas, por lo que solo se puede recoger información al respecto a través de empresas comerciales que las instalen y de los DIT (*Documentos de Idoneidad Técnica*)<sup>439</sup>. Respecto a su instalación, se recomienda en cubiertas planas de pendiente 0, y la capa de agua se puede cubrir y/o combinar con cubiertas ajardinadas, especialmente extensivas (véase apartado 4.5.3)<sup>440</sup>. Los principales problemas de este sistema son la imprescindible estanqueidad y el mayor coste de construcción y mantenimiento (especialmente si se pretende que esta capa de agua se emplee como lámina decorativa), ya que para que el sistema funcione correctamente es recomendable instalar un alimentador continuo de agua que permita renovarla (y contrarrestar la evaporación) y rebosaderos que recojan el agua sobrante en épocas de lluvia<sup>441</sup>. Las principales capas, que se pueden observar en la figura 4.67, son: soporte estructural, barrera de vapor, aislamiento térmico, lámina impermeable y lámina de agua<sup>442</sup>.

Yang *et al.*<sup>443</sup> desarrollaron diferentes investigaciones sobre una cubierta aljibe en un edificio de Guangzhou (China), en un clima subtropical. Estudiaron la capacidad de almacenamiento de calor de la lámina de agua, comprobando que evitaba que el aumento de la temperatura ambiente y la radiación solar directa se transmitieran directamente al interior, produciéndose un desfase y un amortiguamiento de la onda térmica. Además, no todo el calor absorbido por la masa de agua se transmite, pasadas ciertas horas (desfase), a las capas inferiores de la cubierta y al interior del edificio, sino que cuando aumentan tanto la temperatura como la presión de vapor en la superficie de la lámina de agua, cierta cantidad de agua se evapora y se libera calor al ambiente (amortiguamiento de la onda térmica). Por la noche, en cambio, el flujo de calor se producía desde el interior del edificio hacia el exterior más frío, atenuándose este proceso debido al aljibe y produciéndose un efecto de calentamiento en el interior (poco deseado en las noches de épocas cálidas, pero deseable en épocas frías). Por lo tanto, los principales mecanismos de control térmico en las cubiertas aljibe son el aislamiento térmico de la masa de agua y el enfriamiento por evaporación, que principalmente depende de la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa del ambiente y la velocidad del viento<sup>444</sup>.

De acuerdo con las investigaciones de Yang *et al.*<sup>445</sup>, realizadas en la época cálida, la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie del agua es de media 0,1 °C y la diferencia entre el aire y la base inferior del aljibe (de 10 cm de espesor) es de 0,8 °C, aunque en momentos de máxima radiación (766,9 W/m<sup>2</sup>) la temperatura de la superficie del agua es 6 °C mayor que la temperatura del aire debido a la absorción de la radiación solar incidente por parte de la capa de agua. Por la noche, como ya se ha indicado, el agua disipa el calor al ambiente, por lo que la temperatura de la superficie del aljibe desciende. Yang *et al.*<sup>446</sup> confirmaron también el desfase y amortiguamiento de la onda térmica, ya que en la superficie expuesta de la cubierta tradicional la máxima temperatura se alcanzó a las 13:40 h, con 52,5 °C, mientras que, en la cubierta aljibe, el pico en la superficie bajo la capa de agua se detectó una hora más tarde, a las 14:40 h, ascendiendo a 37,1 °C. También concluyeron que el principal factor de enfriamiento de la cubierta aljibe era la evaporación del agua, llegando a reducir el flujo de calor en la cubierta en un 57,2 % durante el día y un 50,9 % durante la noche. La mayor reducción del flujo de calor por el día les permitió establecer una relación directa entre el incremento de la radiación solar y el aumento del índice de evaporación, ya que durante el día el índice de evaporación es 2,8 veces mayor que durante la noche (el agua evaporada durante el día es el 62,4 % del agua total evaporada a lo largo del día). De acuerdo con los datos que obtuvieron, el calor latente debido a la evaporación durante todo el día es el 43,8 % de la energía acumulada por la absorción de radiación solar.

438 Yang, W., Wang, Z., Zhao, X. 2015.

439 Paradela, M.L.S. 2020d.

440 *Ibidem*.

441 *Ibidem*.

442 *Ibidem*.

443 Yang, W., Wang, Z., Zhao, X. 2015.

444 *Ibidem*.

445 *Ibidem*.

446 *Ibidem*.



Igualmente, un aumento de la velocidad del viento también implicaba aumentos del índice de evaporación. Finalmente, los resultados de Yang *et al.*<sup>447</sup> también mostraron que la profundidad de la lámina de agua no tiene un impacto significativo en el almacenamiento de calor y el desfase y amortiguamiento de la onda térmica, pero niveles inferiores a 10 cm de agua sí que afectaban negativamente al índice de evaporación.

- |                      |                             |
|----------------------|-----------------------------|
| 1 Soporte resistente | 4 Perfil colaminado         |
| 2 Barrera de vapor   | 5 Lámina impermeable - EPDM |
| 3 Aislante térmico   | 6 Lámina de agua (≥ 10 cm)  |

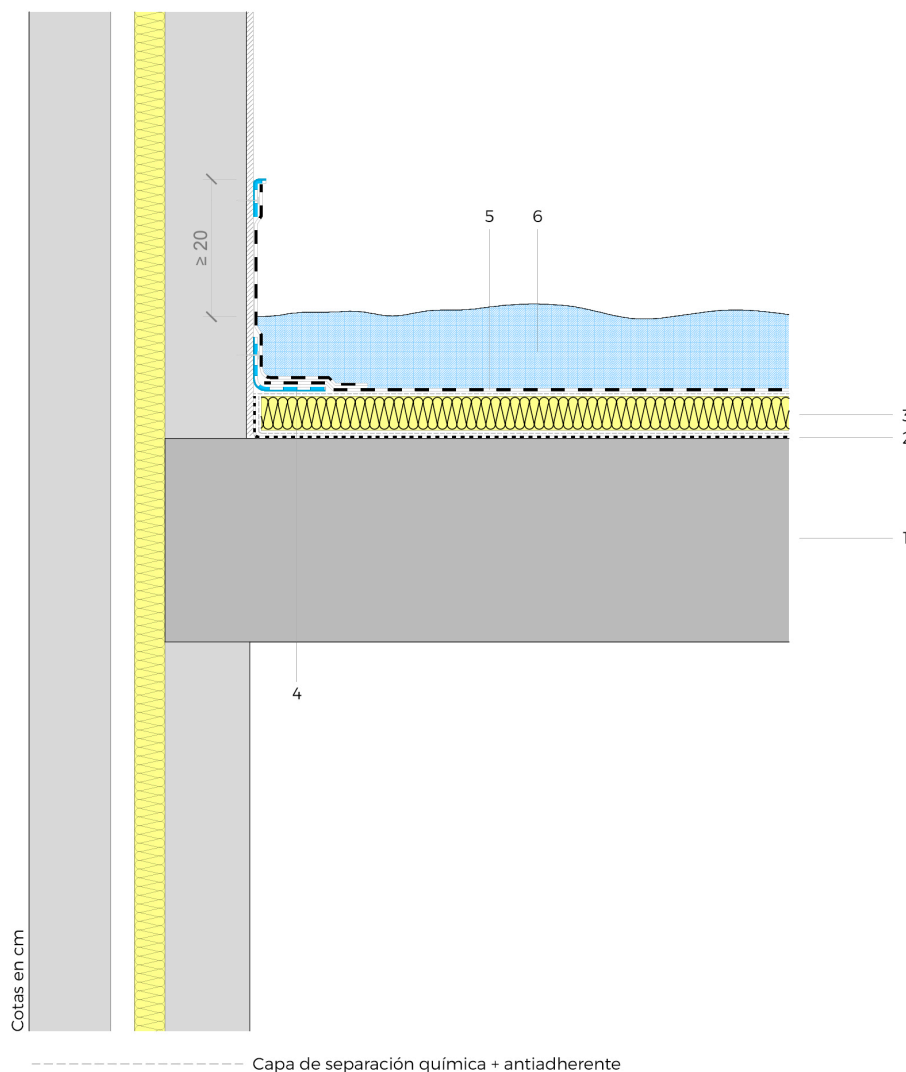


Figura 4.67. Encuentro de cubierta aljibe con paramento vertical.

### 4.5.3 Polder roof (cubierta aljibe ajardinada)

La *polder roof* se define como una “cubierta ajardinada especialmente hecha para almacenar agua”<sup>448</sup>, y consiste en la combinación de una cubierta aljibe con un acabado superior de cubierta ajardinada, construida sobre una base resistente de losas filtrantes sobre soportes regulables (o plots) hundidos en la capa de agua. Esta solución de aljibe cubierto también se podría emplear simplemente con un pavimento flotante sobre plots, generando una capa superior transitable. La combinación de cubierta ajardinada con aljibe también recibe el nombre de *green blue roof* o *retention roof*. El concepto de *green blue roof* fue desarrollado por el *Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology* (KICT) y, al igual que el sistema

447 Yang, W., Wang, Z., Zhao, X. 2015.

448 Van der Meulen, S.H. 2019.



*polder roof*, consiste en la configuración de una cubierta ajardinada con una capa extra exclusivamente para almacenar agua, pudiendo llegar a acumular más agua que una cubierta aljibe en las mismas condiciones, ya que se debe considerar que, aparte del agua de la propia capa de almacenamiento, también hay agua en el sustrato y la vegetación<sup>449</sup>. Esta agua almacenada se puede emplear en el riego de la propia cubierta ajardinada, pero también en otras funciones<sup>450</sup>. Por ejemplo, se puede aprovechar su almacenamiento en altura para la instalación de turbinas que permitan transformar su energía potencial en electricidad<sup>451</sup>. También se puede emplear con fines domésticos que no requieran agua potable<sup>452</sup>. Si se pretende que el agua del aljibe se emplee como riego de la vegetación, en base a la ascensión por capilaridad del agua acumulada hasta la estructura de raíces, es recomendable emplear una lámina absorbente capaz de favorecer este proceso<sup>453</sup> (véase apartado 4.1.7.1).

A la hora de diseñar estas cubiertas ajardinadas con una capa extra de almacenamiento de agua (Figura 4.68) se deben tener en cuenta los siguientes detalles, de acuerdo con la guía de la FLL<sup>454</sup>:

- La retención de agua debe concebirse como una capa más, sin implicar un permanente encharcamiento de la cubierta ajardinada.
- Controlar el funcionamiento del sistema de drenaje y del sistema de evacuación de agua de emergencia, independientemente de los deseos de almacenar agua.
- Se debe planear desde el principio el volumen de acumulación de agua deseado, la carga que esto implica y la cota máxima de llenado del agua.
- La lámina impermeable debe ser adecuada para la situación de carga particular.

En verano, la humedad continúa aportada al sustrato por una *polder roof* afecta decisivamente en la disminución de las temperaturas superficiales, tanto por encima como por debajo del sustrato, ya que se consigue que la vegetación sea más exuberante y consuma más energía en el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración, y la mayor humedad en el sustrato acelera y aumenta la evaporación, disipando más calor acumulado. En invierno, si el sistema se encuentra sin vegetación, es más aconsejable vaciar el aljibe, ya que el consumo de energía debido a la masa de agua es mayor que el consumo de energía de una cubierta tradicional. Esto se debe a que la masa de agua, debido a su gran capacidad térmica, necesita mucha energía para estabilizar la temperatura de todo el volumen. Además, durante el invierno se produce una pérdida de calor por evaporación natural en la hora de mayor radiación y cuando llueve, el aljibe se llena de agua fría, sustituyendo a la que ya tenía una temperatura estable, y aumentando las pérdidas y el consumo de energía<sup>455</sup>.

Britto<sup>456</sup> analizó el comportamiento térmico (flujos de calor, ahorro energético y desfase y amortiguamiento de la onda térmica) de diferentes cubiertas en Madrid (España): *polder roof* extensiva con aislamiento (9 cm de espesor de sustrato), cubierta ajardinada extensiva con aislamiento (9 cm de espesor de sustrato), cubierta extensiva sin aislamiento (12 cm de espesor de sustrato, para cumplir con las exigencias térmicas de la normativa española aun sin tener una capa de aislamiento), cubierta plana tradicional con aislamiento y cubierta plana tradicional sin aislamiento.

En verano la cubierta extensiva aljibe con aislamiento presentó el menor consumo energético (3,14 Wh/m<sup>2</sup>), mientras que, en comparación, el consumo de la cubierta extensiva con aislamiento era 6 veces superior, 14 veces superior al de la cubierta extensiva sin aislamiento y 21 veces superior al de la cubierta plana con aislamiento. Estas conclusiones nos demuestran, entre otras cosas, que, aunque una cubierta ajardinada puede mejorar la protección térmica de un edificio por sí misma, no se debería reemplazar nunca a

449 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

450 Cristiano, E., Deidda, R., Viola, F. 2021; De Dakdokters. 2022; Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

451 Cristiano, E., Deidda, R., Viola, F. 2021.

452 De Dakdokters. 2022; Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.

453 Britto, C. 2001; Paradela, M.L.S. 2020d.

454 FLL. 2018.

455 Britto, C. 2001.

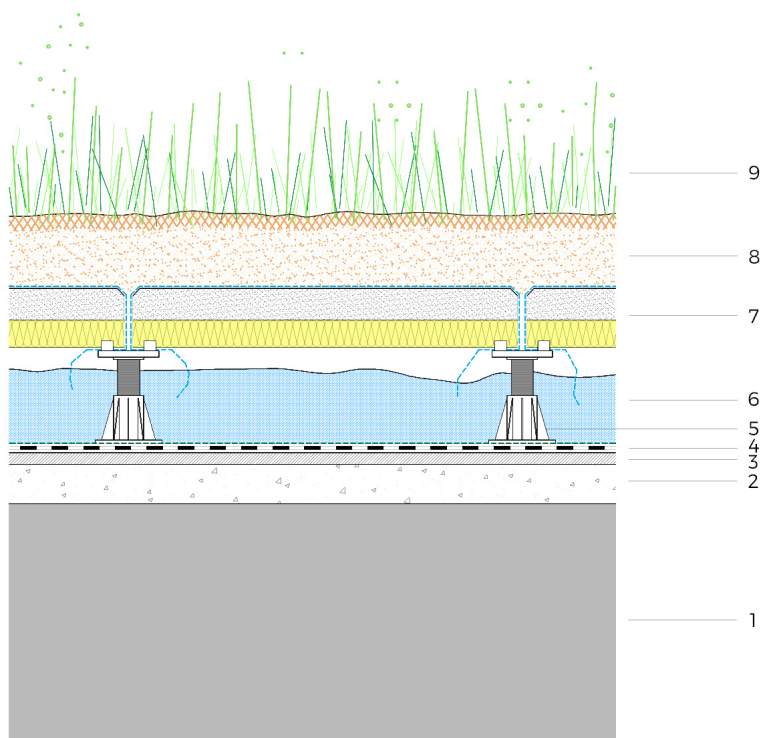
456 *Ibíd.*



la capa de material aislante por un mayor espesor de substrato<sup>457</sup>. En invierno, en cambio, Britto<sup>458</sup> detectó que el consumo energético era prácticamente el mismo al comparar la cubierta aljibe extensiva, la cubierta extensiva con aislamiento y la cubierta plana con aislamiento.

Shafique *et al.*<sup>459</sup> estudiaron una *polder roof* construida en la cubierta de una escuela de Chungwoon (Seúl, Corea del Sud) analizando su capacidad de reducción de la escorrentía de lluvia y el retraso en el pico de escorrentía. La reducción del pico de escorrentía y el aumento del tiempo que tarda la cubierta en empezar a liberar el agua de lluvia mejora en estas cubiertas respecto a una cubierta ajardinada con capa drenante, debido a la capa independiente de almacenamiento extra de agua, que es capaz de contener mayor volumen de agua que las capas drenantes o retenedoras. Los datos obtenidos, para una intensidad media de lluvia de 90 mm/hora en el mes de octubre, mostraron que la cubierta aljibe ajardinada reducía la escorrentía de agua de lluvia, retenía mayor cantidad de agua y aumentaba el tiempo de concentración. También obtuvieron datos respecto a la reducción de la temperatura de la superficie de la cubierta, disminuyendo en más de 5 °C respecto a la superficie de una cubierta tradicional.

- |                                 |                                   |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 Soporte resistente            | 6 Depósito para retención de agua |
| 2 Hormigón ligero de pendientes | 7 Losa filtrante                  |
| 3 Mortero de regulación         | 8 Substrato                       |
| 4 Lámina impermeable - EPDM     | 9 Vegetación                      |
| 5 Plot regulable en altura      |                                   |



- Capa separadora antipunzonante
- - - - - Filtro absorbente

Figura 4.68. Detalle general de una cubierta aljibe extensiva (o polder roof).

457 Eumorfopoulou, E., Aravantinos, D. 1998.

458 Britto, C. 2001.

459 Shafique, M., Kim, R., Lee, D. 2016.



## 5. COMPARATIVA DE CUBIERTAS AJARDINADAS

### 5.1 TABLA COMPARATIVA DE CUBIERTAS AJARDINADAS

A continuación, se presenta una tabla resumen que pretende servir como comparativa de las principales características y condicionantes más importantes a la hora de escoger entre los diferentes tipos de cubierta ajardinada más comunes (Tabla 5.1). Para la elaboración se ha tomado como referencia principal los datos aportados por la *Guia de Terrats Vius y Cobertes Verdes*, realizada por el Ajuntament de Barcelona<sup>1</sup>. En base a este mismo documento, se ha elaborado una tabla que presenta las posibles combinaciones de los diferentes tipos de sistemas ajardinados en una misma cubierta (Tabla 5.2).

<sup>1</sup> Ajuntament de Barcelona. 2015.



TIPO DE CUBIERTA	COSTE ORIENTATIVO (€/m <sup>2</sup> )	VEGETACIÓN RECOMENDADA	SUBSTRATO RECOMENDADO (cm)	PESO ORIENTATIVO (kg/m <sup>2</sup> )
<b>EXTENSIVA</b>	70-90  Incluye: lámina impermeable, drenante, filtrante, substrato y vegetación.	Plantas suculentas, herbáceas perennifolias y vivaces.  En climas mediterráneos, se recomienda la implantación de especies adaptadas a la zona.	8-15 cm.  Para el clima mediterráneo no se aconseja emplear menos de 10 cm.  Mineral y muy poroso	60-180 <sup>1</sup>
<b>SEMIINTENSIVA</b>	90-130  Incluye: lámina impermeable, drenante, filtrante, substrato y vegetación.	Plantas herbáceas perennifolias, cespitosas, vivaces y subarbusivas.  En climas mediterráneos, se recomienda la implantación de especies adaptadas a la zona.	15-30 cm.  Mineral y poroso. El porcentaje de materia orgánica es más elevado que en las extensivas	150-350 <sup>1</sup>
<b>INTENSIVA</b>	> 150  Depende del diseño y los usos de la cubierta.  Incluye: lámina impermeable, drenante, filtrante, substrato y vegetación.	Plantas herbáceas perennifolias, cespitosas, vivaces, subarbusivas, arbustivas y árboles.	30-100 cm  Combinación de parte mineral y porosa con una parte importante de materia orgánica. Estratificación para impedir hundimiento o deterioro.	> 600 <sup>1</sup>
<b>HUERTO (INTENSIVA)</b>	> 120  Depende del espesor de substrato.  Incluye: lámina impermeable, drenante, filtrante, substrato y vegetación.	Plantas hortícolas, aromáticas, medicinales y árboles frutales.	30-40 cm.  Puede llegar a 60 cm en el caso de árboles frutales.  Combinación de parte mineral y porosa con una parte importante de materia orgánica. Estratificación para impedir hundimiento o deterioro.	> 450





MANTENIMIENTO	ACCESIBILIDAD	RIEGO RECOMENDADO
<p><u>Bajo.</u></p> <p>Tareas principales:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Conseguir una buena implantación de la vegetación (control del agua durante los cuidados de desarrollo).</li><li>• Evitar la aparición y desarrollo de malas hierbas.</li><li>• Control y limpieza de elementos de desagüe.</li></ul>	Accesible solo para mantenimiento.	<p>Riego por goteo</p> <p>Se necesita especialmente en la época de desarrollo, y conforme la vegetación se establezca se puede disminuir la cantidad y la frecuencia, llegando a funcionar solo en épocas de sequía</p>
<p><u>Moderado</u> (depende del tipo de vegetación).</p> <p>Tareas principales:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Evitar la aparición y desarrollo de malas hierbas.</li><li>• Control del sistema de riego.</li><li>• Incorporación puntual de fertilizantes.</li><li>• Poda y recorte.</li><li>• Control y limpieza de elementos de desagüe.</li></ul>	Transitable.	<p>Riego por goteo</p> <p>Requieren muy poca agua: cuando la vegetación ya se ha establecido suele ser suficiente con dos riegos al mes en primavera y otoño, y una o dos veces a la semana en verano. En todo caso depende de la ubicación de la cubierta, las especies vegetales y la climatología.</p>
<p><u>Elevado.</u></p> <p>Tareas principales:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Evitar la aparición y desarrollo de malas hierbas.</li><li>• Control del sistema de riego.</li><li>• Incorporación de fertilizantes.</li><li>• Poda y recorte.</li><li>• Control y limpieza de elementos de desagüe.</li><li>• Control y tratamientos fitosanitarios.</li><li>• Limpieza de superficies.</li><li>• Mantenimiento de mobiliario, pavimentos, etc.</li></ul>	Transitable, similar a un jardín.	<p>Riego por goteo, aunque a veces para zonas con césped se puede utilizar riego por aspersión.</p> <p>El aporte de agua depende de la vegetación, la ubicación de la cubierta y las condiciones climatológicas.</p> <p>Interesante ubicar bocas de riego para facilitar la colocación de mangueras para limpiar el pavimento, mobiliario y otras instalaciones</p>
<p><u>Elevado.</u></p> <p>Tareas principales:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Plantación.</li><li>• Evitar la aparición y desarrollo de malas hierbas.</li><li>• Control del sistema de riego.</li><li>• Poda y recorte.</li><li>• Abono orgánico.</li><li>• Control y limpieza de elementos de desagüe.</li><li>• Control y tratamientos fitosanitarios.</li><li>• Recolección.</li><li>• Limpieza de caminos.</li></ul>	Transitable.	<p>Riego por goteo, y conviene instalar bloques de goteo.</p> <p>El aporte de agua depende de la vegetación, de la ubicación de la cubierta y de la climatología</p>



<b>CON PANELES FOTOVOLTAICOS</b>	~ 450 <sup>2</sup> + coste del sistema de ajardinamiento escogido.	Plantas de acuerdo con el espesor de sustrato escogido.	> 14 cm	> 250 <sup>3</sup>
<b>ALJIBE</b>	20-70 <sup>5</sup> Incluye: barrera de vapor, lámina impermeable y capa de agua.		≥ 10 cm (capa de agua) <sup>4</sup>	> 100 <sup>5</sup> Para una capa mínima de 10 cm de agua sobre cubierta convencional.
<b>POLDER ROOF</b>	> 90 <sup>5</sup> Depende del espesor de sustrato y de la losa filtrante. Incluye: lámina impermeable, losas filtrantes (35+40) sobre plots, llenado del aljibe, fieltro absorbente, sustrato y vegetación.	Plantas de acuerdo con el espesor de sustrato escogido.	30-54 cm (capa de agua + sustrato) <sup>7</sup> . Se recomienda espesores de sustrato entre 8 y 30 cm.	> 250 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

<sup>2</sup> CYPE Ingenieros. 2022.

<sup>3</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.

<sup>4</sup> Ortiz, L.L. 2018; Paradela, M.L.S. 2020d.

Tabla 5.1. Comparativa de diferentes tipos de cubiertas ajardinadas.

	<b>EXTENSIVA</b>	<b>SEMIINTENSIVA</b>	<b>INTENSIVA</b>
<b>EXTENSIVA</b>			
<b>SEMIINTENSIVA</b>			
<b>INTENSIVA</b>			
<b>HUERTO</b>			
<b>PANELES FOTOVOLTAICOS</b>			
<b>ALJIBE</b>			
<b>POLDER ROOF</b>			

Tabla 5.2. Posibles combinaciones de diferentes tipos de cubiertas ajardinadas.



En función del ajardinamiento escogido. A todos los casos hay que sumar la revisión del estado y el funcionamiento de las placas solares.	Depende del sistema de ajardinamiento escogido.	Depende del sistema de ajardinamiento escogido.
<p><u>Elevado.</u></p> <p>Tareas principales<sup>6</sup>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tratamiento para la salubridad del agua.</li> <li>• Eliminar partículas en suspensión.</li> <li>• Evitar que proliferen insectos.</li> <li>• Tratamiento con antialgas, cloro, etc.</li> <li>• Limpieza de hojas y basura transportada por el viento.</li> <li>• Comprobación del estado de la lámina impermeable.</li> </ul>	<p>Accesible solo para mantenimiento.</p> <p>Puede ser transitable si se coloca pavimento sobre plots<sup>6</sup>.</p>	
<p><u>Bajo.</u></p> <p>Tareas principales:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conseguir una buena implantación de la vegetación (control del agua durante los cuidados de desarrollo).</li> <li>• Evitar la aparición y desarrollo de malas hierbas.</li> <li>• Control y limpieza exhaustivos de elementos de desagüe.</li> <li>• Comprobación del estado de la lámina impermeable.</li> </ul>	<p>Accesible solo para mantenimiento.</p>	<p>Se puede emplear la propia agua almacenada como sistema de riego<sup>8</sup>, tanto alimentando un sistema de riego como por capilaridad.</p>

<sup>5</sup> Véase Anexo I.

<sup>6</sup> Ortiz, L.L. 2018.

<sup>7</sup> Singular green. 2022.

<sup>8</sup> De Dakdokters. 2022.

HUERTO	PANELES FOTOVOLTAICOS	ALJIBE	POLDER ROOF



## 5.2 CATÁLOGO DE CUBIERTAS AJARDINADAS

### 5.2.1 Cubierta ajardinada extensiva

En este tipo de cubierta resulta de vital importancia conseguir un buen drenaje por lo que se recurre a pendientes mayores al 2 % o a placas drenantes de 4 cm o más de altura combinadas con un sustrato muy poroso (esta última opción es menos recomendable) (Figura 5.1). También se debe asegurar un buen aireamiento de las raíces, por lo que surge la necesidad de colocar franjas de grava, libres de vegetación, junto a elementos como sumideros, en el perímetro de las cubiertas, etc. Al mismo tiempo resulta muy importante retener la mayor cantidad de agua y nutrientes posibles, por lo que se recomienda el uso de láminas retenedoras o de placas drenantes que sean capaces de almacenar agua<sup>2</sup>, en combinación con un sustrato capaz de combinar una alta capacidad de almacenamiento de agua (WHC) con un bajo porcentaje de materia orgánica.

Este sistema de cubierta ajardinada se puede aplicar para pendientes de hasta el 100 % (45 °), pero en pendientes mayores al 30 % se hace necesaria la instalación de tejidos antierosión, mientras que en pendientes mayores al 40 % se deben colocar también barreras antiempuje<sup>3</sup>.

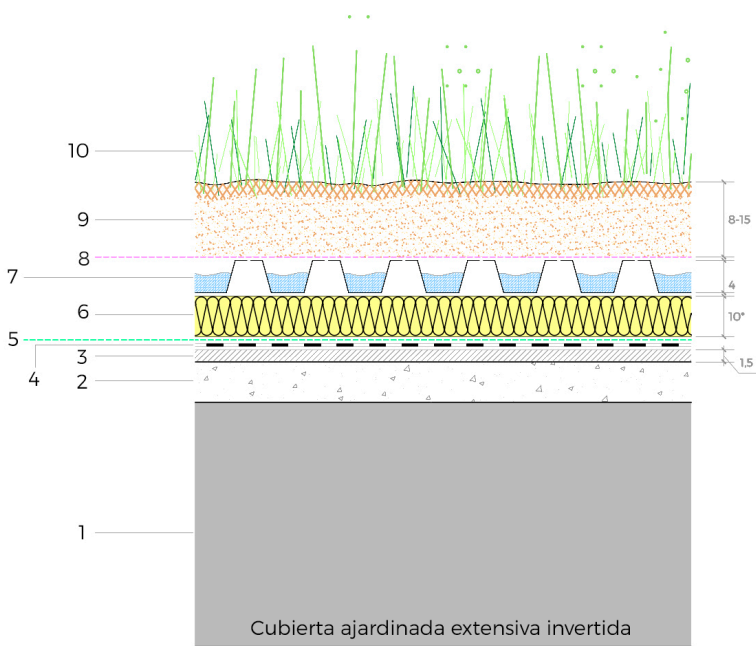
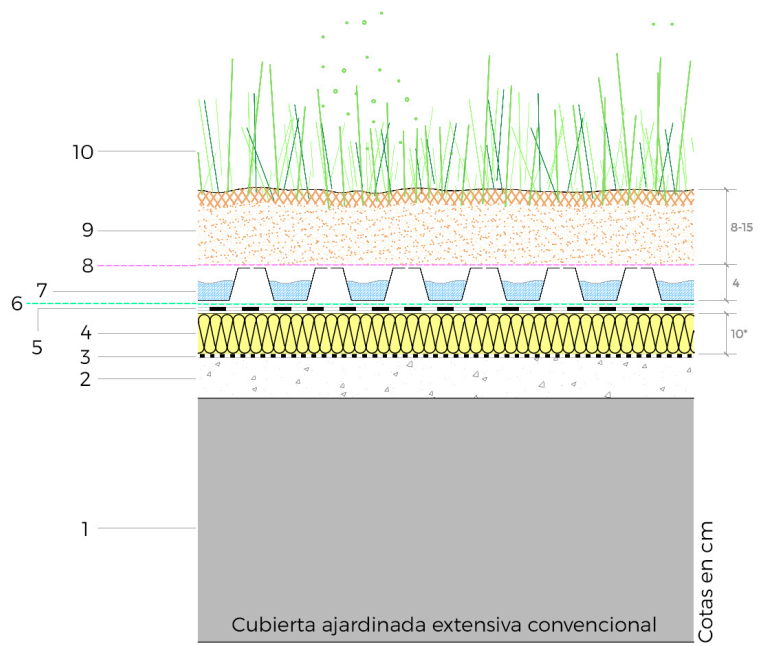
---

<sup>2</sup> Ajuntament de Barcelona. 2015.

<sup>3</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021b.



- 1 Soporte resistente
- 2 Hormigón en masa de pendientes
- 3 Barrera de vapor
- 4 Aislante térmico
- 5 Lámina impermeable - EPDM
- 6 Lámina antiraíces
- 7 Capa drenante (paneles plásticos)
- 8 Lámina filtrante
- 9 Substrato para cubiertas extensivas
- 10 Vegetación para cubiertas extensivas



- 1 Soporte resistente
- 2 Hormigón ligero de pendientes
- 3 Mortero de regulación
- 4 Lámina impermeable - EPDM
- 5 Lámina antiraíces
- 6 Aislante térmico
- 7 Capa drenante (paneles plásticos)
- 8 Lámina filtrante
- 9 Substrato para cubiertas extensivas
- 10 Vegetación para cubiertas extensivas

\* Aislamiento para València (España), con zona climática B3 de acuerdo con el CTE DB-HE<sup>4</sup>. A saber, para todos los detalles de cubiertas ajardinadas realizados.

Figura 5.1. Sistema multicapa de una cubierta ajardinada extensiva.



### 5.2.2 Cubierta ajardinada semiintensiva

En este sistema también resulta de gran importancia la aireación de las raíces y el correcto drenaje del agua del sistema, aunque en este caso las placas drenantes serán siempre de 4 cm o más, ya que este tipo de cubiertas también necesitan mayor almacenamiento de agua<sup>5</sup>. Cabe recordar que la altura recomendada para las placas drenantes plásticas es entre 3 y 5 cm<sup>6</sup>, mientras que, en el caso de emplear materiales granulares, se recomienda una altura mínima de 6 cm<sup>7</sup> (Figura 5.2).

En este caso, la aplicación de estas cubiertas se recomienda en pendientes hasta el 60 %, ya que en pendientes mayores se aconseja únicamente el cultivo de especies tipo *sedum*, por lo que es recomendable la instalación de una cubierta extensiva<sup>8</sup>. Aun así, hay autores que tan solo aceptan la instalación de este tipo de cubiertas, al igual que las intensivas, para pendientes menores o iguales al 10 % (hasta 5 °)<sup>9</sup>.

En el caso de que vayan a ser cubiertas transitables y para uso recreativo, la pendiente se deberá adaptar a la circulación de personas, es decir, pendientes menores al 5 %, siendo recomendable una pendiente del 3 % para la circulación de personas y disminuyendo hasta el 2 % en el caso de instalarse mobiliario<sup>10</sup>.

---

5 Ajuntament de Barcelona. 2015.

6 Zimmermann, A. 2015.

7 Cascone, S. 2019.

8 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021b.

9 Zimmermann, A. 2015.

10 Mas, Á. 2020.



- 1 Soporte resistente
- 2 Hormigón en masa de pendientes
- 3 Barrera de vapor
- 4 Aislante térmico
- 5 Lámina impermeable - EPDM
- 6 Lámina antiraíces
- 7 Capa drenante (materiales granulares/paneles plásticos)
- 8 Lámina filtrante
- 9 Substrato para cubiertas semi-intensivas
- 10 Vegetación para cubiertas semi-intensivas

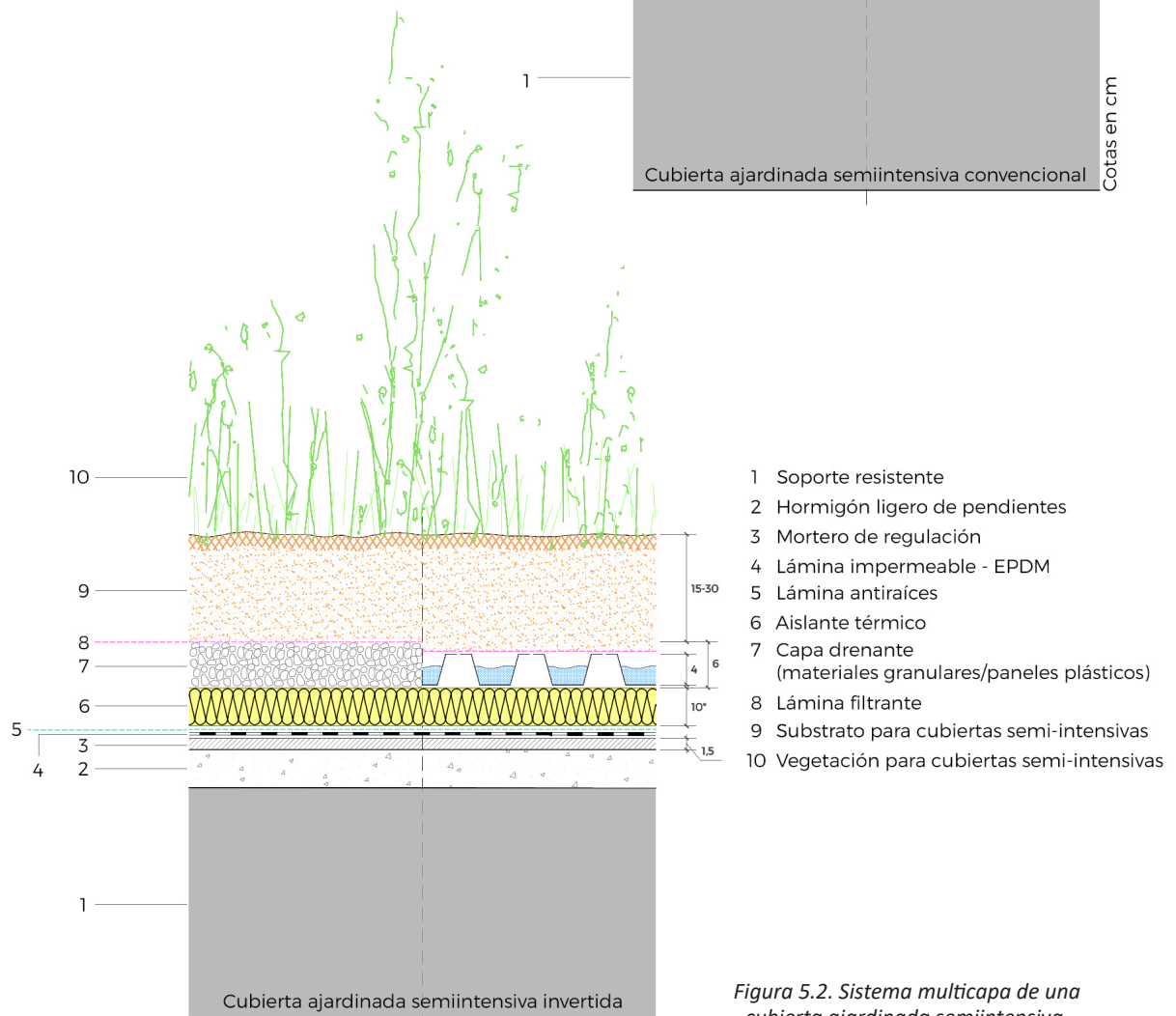
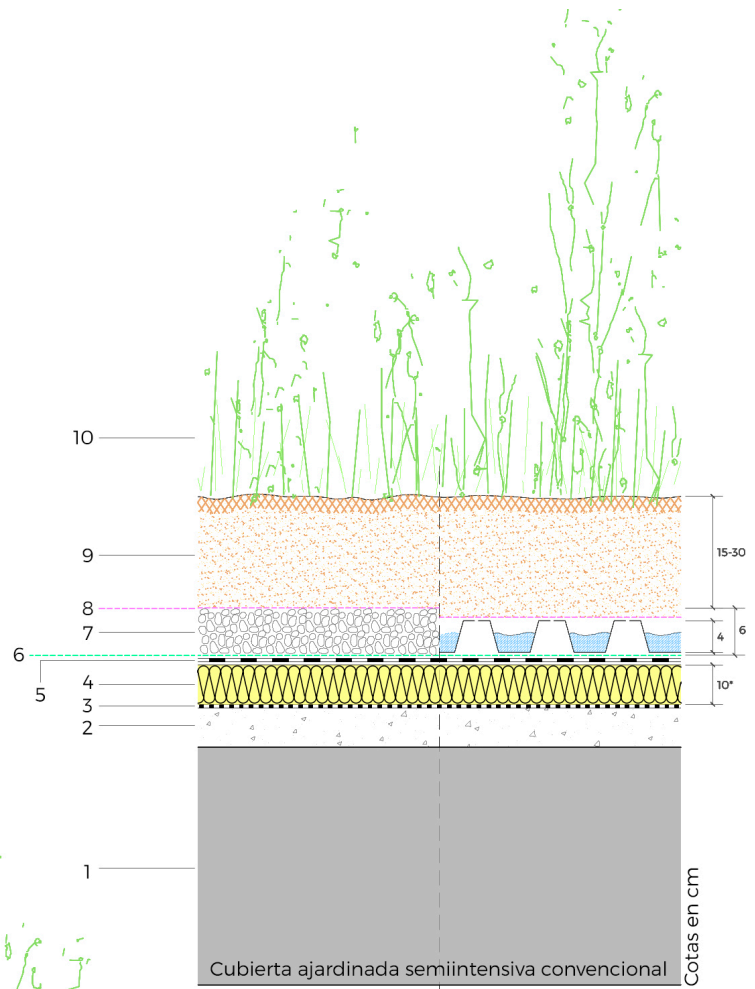


Figura 5.2. Sistema multicapa de una cubierta ajardinada semiintensiva.



### **5.2.3 Cubierta ajardinada intensiva**

En el caso de las cubiertas intensivas, debido a las necesidades de la vegetación, la lámina drenante debe ser de mayor altura, aproximadamente 6 cm, para conseguir un mejor y mayor almacenamiento de agua, en combinación con un mayor espesor de substrato. Los elementos drenantes y retenedores de agua, al mismo tiempo, deberán ser más resistentes que en los casos anteriores, ya que deben soportar mayores cargas y la acción de las raíces, que en el caso de cubiertas intensivas puede ser más agresiva<sup>11</sup>. Es por ello que se recomienda el uso de paneles nodulares plásticos de elevada resistencia, pudiéndose combinar con materiales granulares para aumentar su resistencia a compresión o emplear únicamente una capa de materiales granulares (Figura 5.3 y 5.4).

Es de aplicación lo comentado para las pendientes del tipo de cubiertas semiintensiva.

---

11 Ajuntament de Barcelona. 2015.



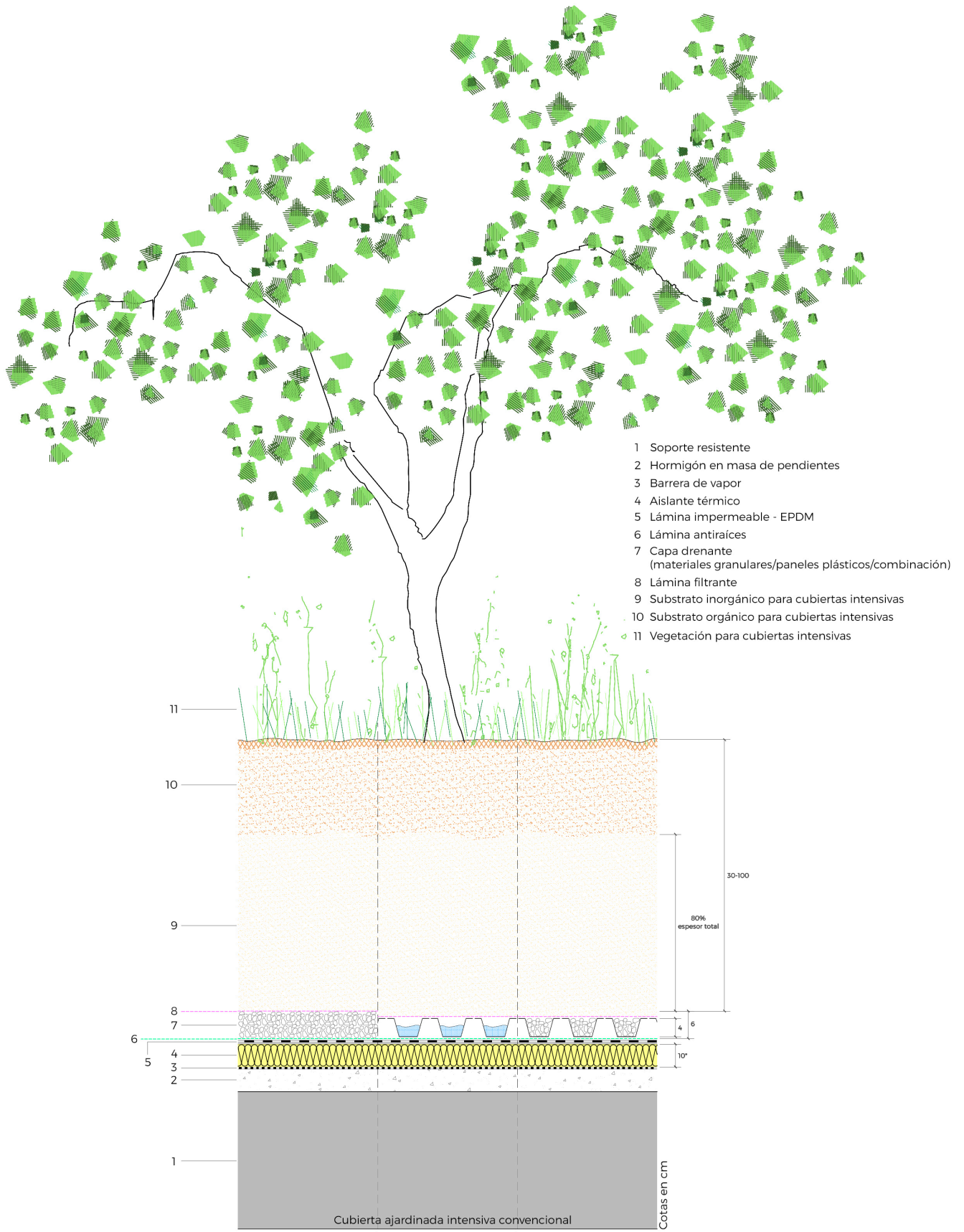


Figura 5.3. Sistema multicapa de una cubierta ajardinada intensiva convencional.

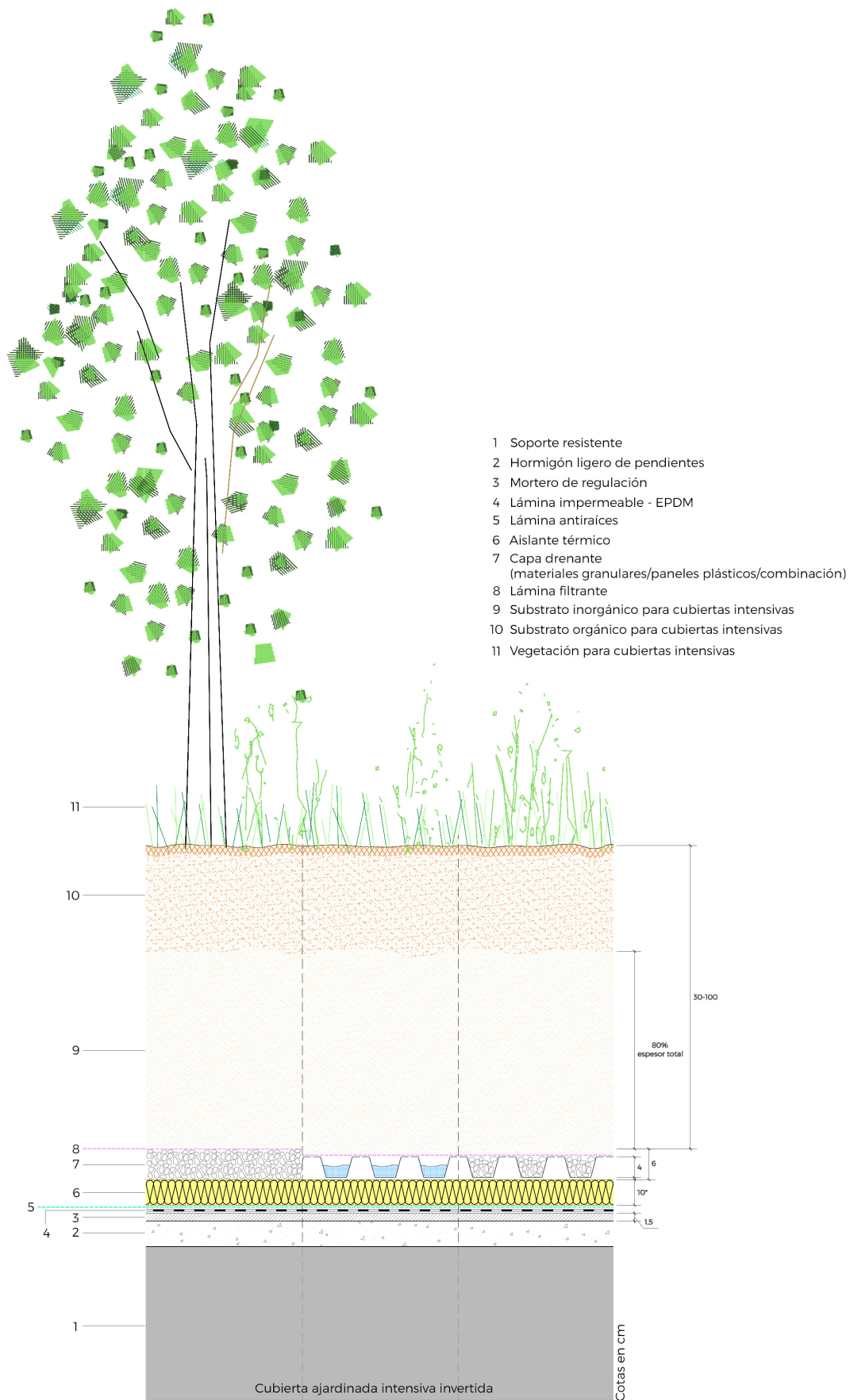


Figura 5.4. Sistema multicapa de una cubierta ajardinada intensiva invertida.



#### **5.2.4 Cubierta ajardinada intensiva: huerto**

Respecto al sistema de huerto, se debe tener en cuenta que el espesor de la capa de sustrato en estas cubiertas se determinará en función de las especies que se cultiven, pudiendo ser menor que el mínimo espesor considerado de forma general para una cubierta intensiva (Figura 5.5). Aun así, se trata de un sistema intensivo debido a los trabajos que requiere, el mantenimiento, el aporte de nutrientes y las necesidades hídricas.

Lo comentado anteriormente para las cubiertas intensivas también es de aplicación en este caso. Además, se deben considerar ciertas particularidades como que en el perímetro de la zona ajardinada de cultivo se establecerán caminos de circulación, debiéndose ejecutar correctamente considerando posibles desniveles entre la zona con vegetación y la zona pavimentada. Otra característica propia de estas cubiertas es la necesidad de proyectar espacios donde almacenar herramientas y material de labranza, al igual que resulta imprescindible la instalación de al menos un punto de agua donde poder conectar una manguera<sup>12</sup>.

Respecto a las pendientes, ya que estas cubiertas siempre serán transitables, su pendiente debe ser menor al 5 %, recomendándose una pendiente del 3 % para circulación y del 2 % en el caso de que se vaya a instalar mobiliario.

---

12 Ajuntament de Barcelona. 2015.

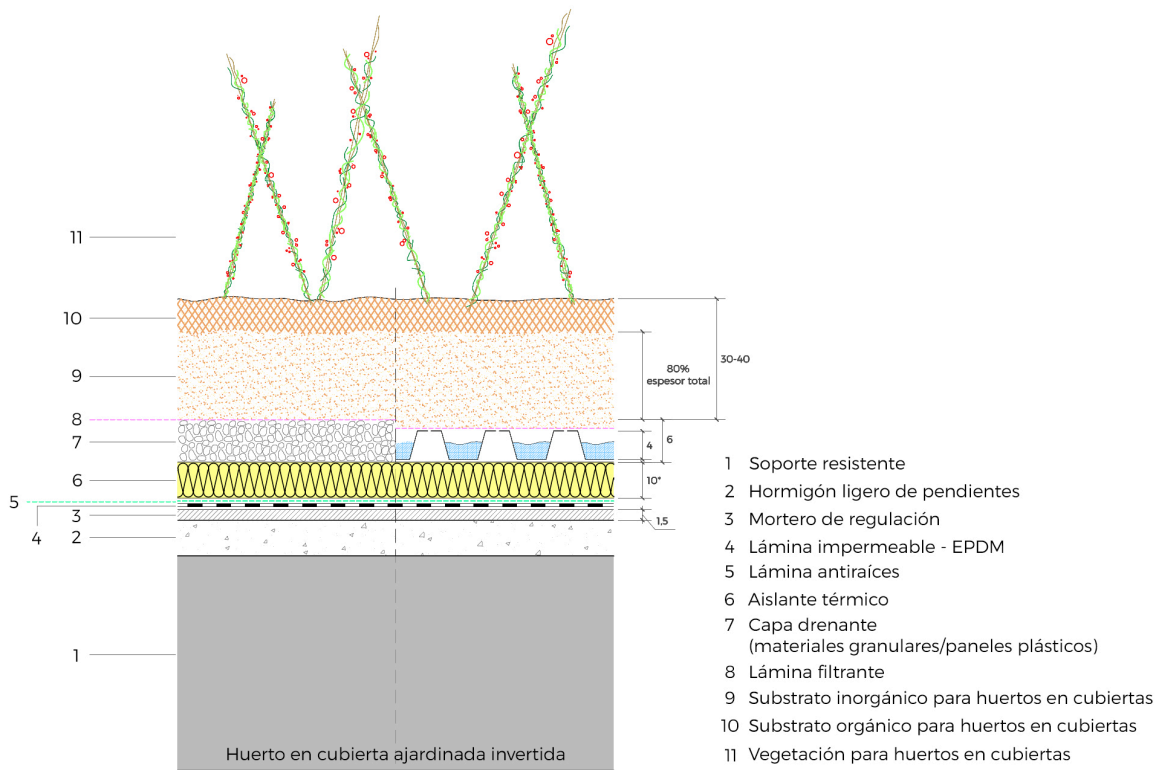
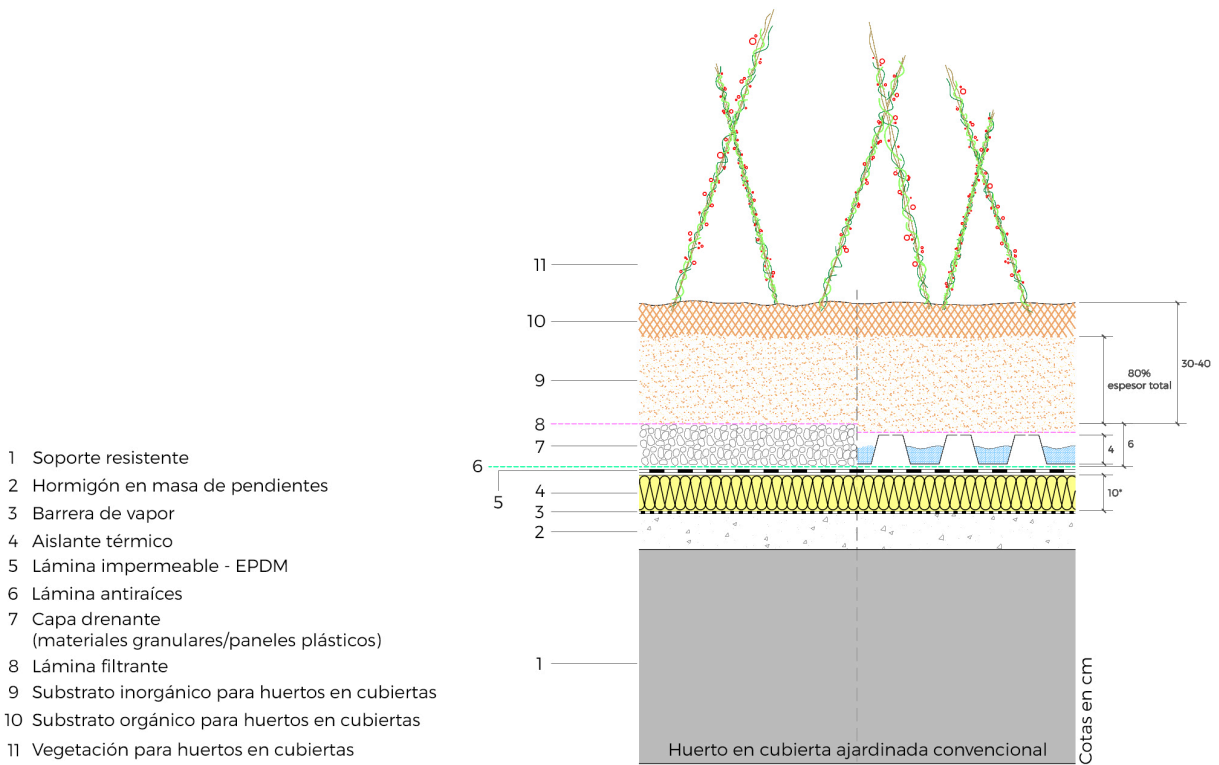


Figura 5.5. Sistema multicapa de un huerto en una cubierta ajardinada.



### 5.2.5 Cubierta ajardinada con paneles fotovoltaicos

Este sistema con paneles fotovoltaicos suele combinarse con cubiertas ajardinadas extensivas, debido a los requerimientos de altura de la vegetación, ya que no debe producir sombra sobre los paneles solares. Las principales formas de instalación de estos paneles son<sup>13</sup>:

Instalar las placas fotovoltaicas directamente sobre la superficie de la cubierta, aunque este sistema presenta riesgos de perforación de la lámina impermeable y un aumento de goteras en el caso de que no se ejecute correctamente.

- 1 Soporte resistente
- 2 Hormigón en masa de pendientes
- 3 Barrera de vapor
- 4 Aislante térmico
- 5 Lámina impermeable - EPDM
- 6 Lámina antiraices
- 7 Capa drenante (paneles plásticos+materiales granulares)
- 8 Lámina filtrante
- 9 Base solar
- 10 Substrato para cubiertas extensivas
- 11 Vegetación para cubiertas extensivas
- 12 Soporte de base solar
- 13 Panel solar fotovoltaico

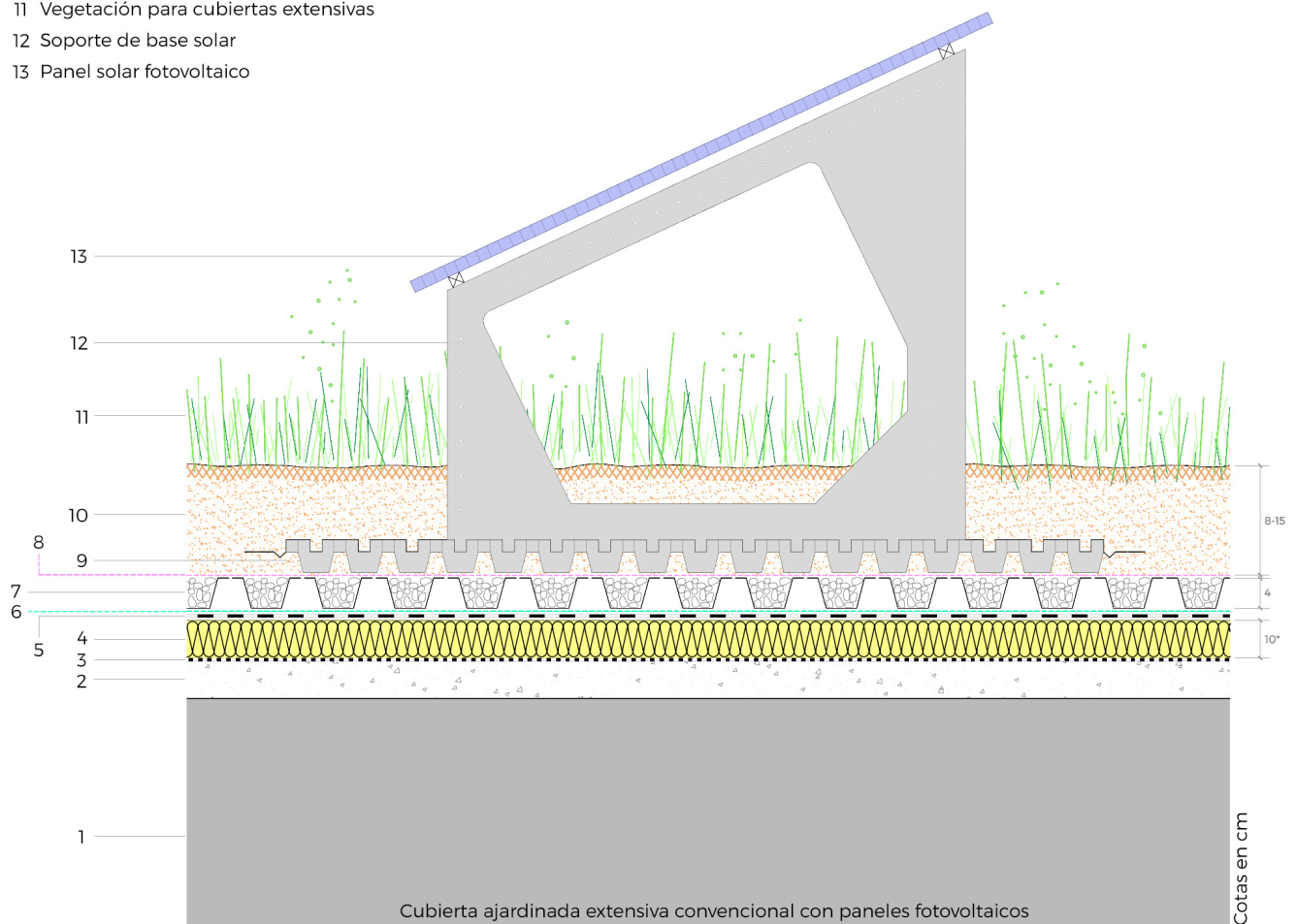


Figura 5.6. Sistema multicapa de una cubierta ajardinada extensiva convencional con paneles fotovoltaicos.

13 Ajuntament de Barcelona. 2015.



Instalar las placas sobre un elemento, tipo porche o pérgola, duplicando la superficie útil de la cubierta, por lo que también se encarece notablemente el coste de construcción.

Instalar las placas fotovoltaicas mediante un sistema prefabricado con bases que se disponen sobre las capas propias de una cubierta extensiva, sin perforar la impermeabilización, y que son estables gracias al peso del substrato sobre ellas.

En este caso, al ser la que presenta más ventajas y una mayor sencillez de instalación, se ha optado por la tercera opción, empleando la solución SolarVert®, de la marca ZinCo<sup>14</sup> (Figura 5.6 y 5.7). En este caso, el elemento de soporte de las placas fotovoltaicas se puede suministrar para pendientes de placas fotovoltaicas entre 10 % (5 °) y 100 % (45 °), en intervalos de 5 °, en función del emplazamiento en el que se instale el sistema (véase apartado 2.2.4).

- 1 Soporte resistente
- 2 Hormigón ligero de pendientes
- 3 Mortero de regulación
- 4 Lámina impermeable - EPDM
- 5 Lámina antiraíces
- 6 Aislante térmico
- 7 Capa drenante (paneles plásticos+materiales granulares)
- 8 Lámina filtrante
- 9 Base solar
- 10 Substrato para cubiertas extensivas
- 11 Vegetación para cubiertas extensivas
- 12 Soporte de base solar
- 13 Panel solar fotovoltaico

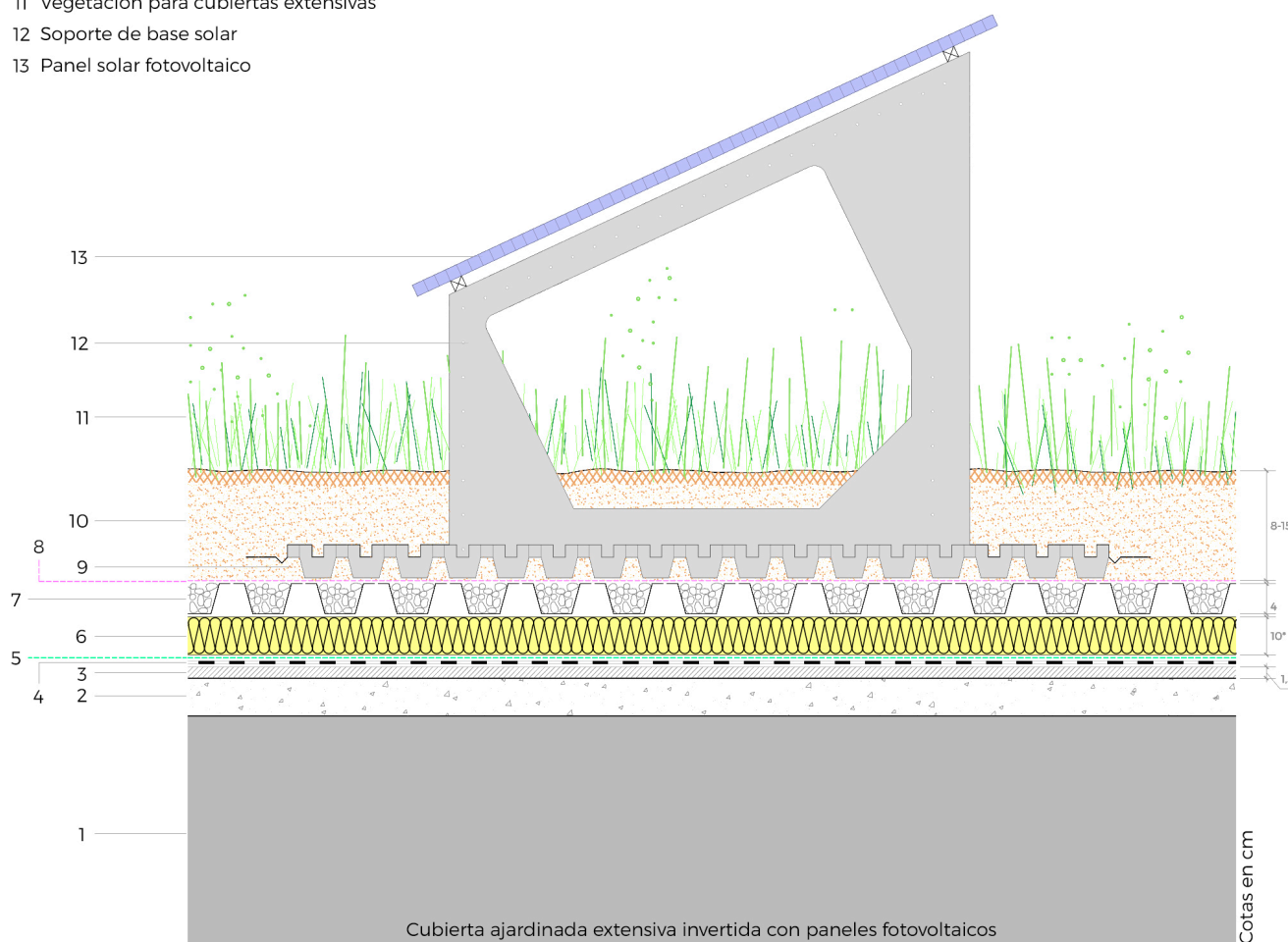


Figura 5.7. Sistema multicapa de una cubierta ajardinada extensiva invertida con paneles fotovoltaicos.

14 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.



### 5.2.6 Cubiertaaljibe

Este tipo de cubiertas se ejecutan en sistemas de pendiente 0<sup>15</sup>, y se debe asegurar en todo momento que la capa de acumulación de agua no sea menor a 10 cm para que la cubierta funcione correctamente (Figura 5.8). Para ello se deben de instalar elementos como alimentadores continuos de agua, que permitan renovar la para contrarrestar la evaporación, y rebosaderos que recojan el agua sobrante y la lleven a la red general de evacuación<sup>16</sup>.

Para evitar pérdidas excesivas de agua por evaporación y que el aumento de la temperatura del agua fomente una proliferación de bacterias y algas, se recomienda proteger el agua de la luz solar (pavimentos flotantes, toldos móviles, sistemas ajardinados o *polder roof*, etc.)<sup>17</sup>.

En el caso de querer disponer zonas transitables, se empleará un pavimento flotante sobre plots, asegurando que el agua de la superficie del pavimento pueda llegar a la capa de almacenamiento de agua (o depósito) a través del material poroso, si se trata de una losa filtrante, o de las juntas abiertas del pavimento<sup>18</sup>.

- 1 Soporte resistente
- 2 Barrera de vapor
- 3 Aislante térmico
- 4 Lámina impermeable - EPDM
- 5 Lámina de agua

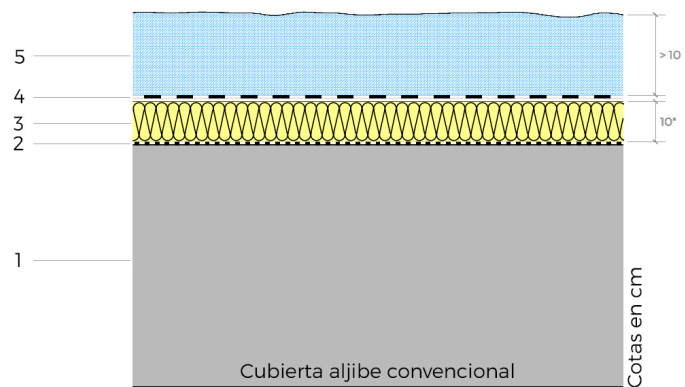


Figura 5.8. Sistema multicapa de una cubiertaaljibe.

15 Gálvez, H.R. 2022.

16 Paradela, M.L.S. 2020d.

17 Ortiz, L.L. 2018.

18 Ibídem.



### 5.2.7 Polder roof

Se trata de un sistema de cubierta aljibe con un acabado exterior de cubierta ajardinada. Habitualmente se emplea la cubierta aljibe en combinación con una cubierta extensiva, la cual funciona como capa protectora del agua (como se ha mencionado en el apartado anterior) y al mismo tiempo como elemento filtrante que permite que el agua discurra por el sustrato y su soporte hasta la capa de almacenamiento de agua que funciona, aquí, a modo de lámina retenedora de agua, o depósito (Figura 5.9). Asimismo, el agua almacenada se podrá emplear, bien por capilaridad, bien mediante un sistema de riego, para humedecer del sustrato y asegurar la supervivencia de la vegetación<sup>19</sup>. El sistema por capilaridad se basa en la disposición de mechales de fieltro sintético geotextil absorbente en contacto con el sustrato y el agua, siendo el sistema recomendable en aquellos casos que el sustrato sea de poco espesor y la separación entre el nivel máximo de agua y la capa interior del sustrato sea mínima (2-5 cm)<sup>20</sup>.

La base soporte del sustrato y la vegetación debe de ser de resistencia suficiente, pudiéndose emplear losas filtrantes sobre plots regulables, cuya altura determina la cámara de almacenamiento de agua. Otra opción puede ser generar una capa de gravas que funcione como colchón de almacenamiento de agua.

Al igual que en el caso de las cubiertas aljibe, este sistema se instala en cubiertas de pendiente 0 y se pueden conseguir unos almacenamientos de agua entre 25 y 120 L/m<sup>2</sup> <sup>21</sup>.

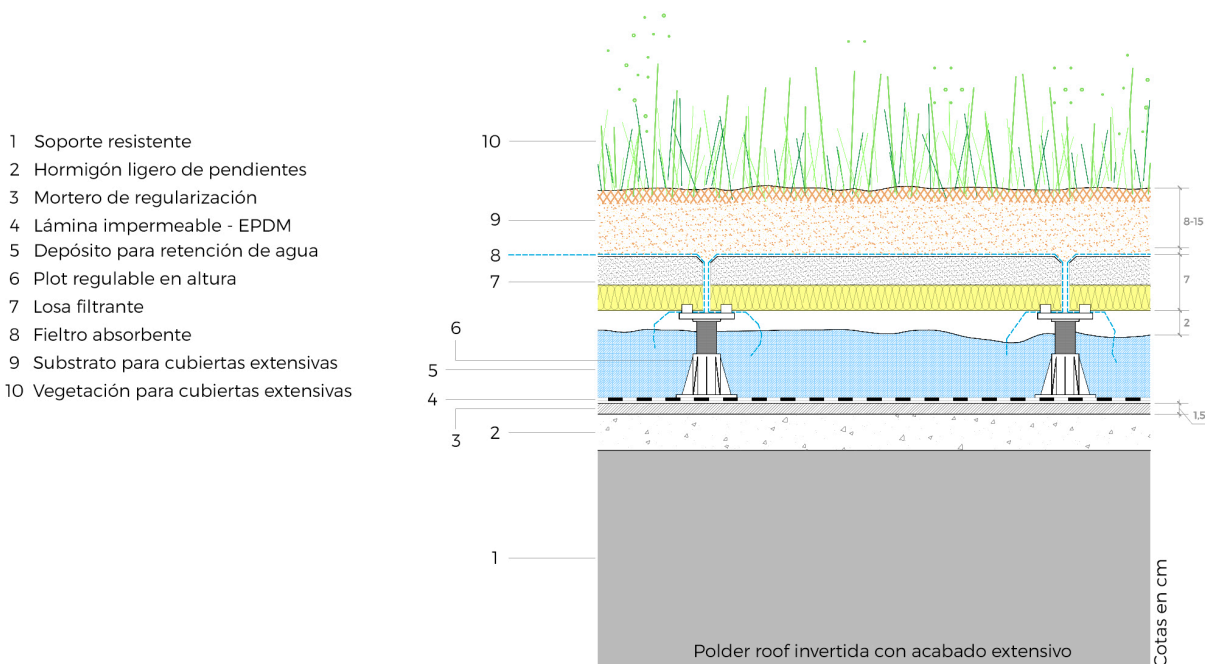


Figura 5.9. Sistema multicapa de una polder roof.

19 De Dakdokters. 2022.

20 Ortiz, L.L. 2018.

21 Atelier Groenblauw. 2022; Gálvez, H.R. 2022.



**CUBIERTAS AJARDINADAS**  
**ESTUDIO TÉRMICO Y ENERGÉTICO**





## 6. MONITORIZACIÓN CON SENSORES EN MODELOS A ESCALA

### 6.1 ESTUDIO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA, EL PESO PROPIO Y EL COSTE <sup>1</sup>

Se considera de suma importancia la obtención de datos reales con el fin de realizar simulaciones. Para ello, en primer lugar, se ha realizado un estudio de distintas propiedades de las secciones constructivas de 16 modelos de cubierta. En concreto, se han detallado los valores de transmitancia térmica, carga de peso propio y coste de construcción de un modelo de referencia (cubierta tradicional con acabado de grava), diez modelos de cubierta ajardinada (extensiva, semiintensiva e intensiva), un modelo de cubierta aljibe y cuatro modelos de *polder roof*. El estudio de estas tres variables se justifica dentro del marco de la viabilidad de las cubiertas ajardinadas como herramienta de rehabilitación (véase apartado 3.1.2.2.1).

La finalidad de este estudio es valorar conjuntamente las variables de transmitancia térmica, peso propio y coste de construcción, con la intención de determinar la adecuación de cada uno de los 16 modelos analizados para una posible rehabilitación. De estos, se escogen finalmente 3 modelos (véase apartado 6.1.1) que se construirán a escala, en maquetas de 1x1 m<sup>2</sup>, para monitorizar sensores de temperatura y humedad relativa durante 1 año. Estas dimensiones responden a la necesidad de crear unos modelos a escala, de pequeño tamaño, pero en los cuales, las sondas (que se situaran en el centro de las maquetas) estuvieran lo suficientemente protegidas y aisladas, evitando que las condiciones de contorno pudieran afectar negativamente a la toma de datos.

Respecto a la transmitancia térmica, se han establecido diferentes espesores de aislante en cada uno de los modelos para poder realizar los cálculos térmicos, con la intención de cumplir, en cada uno de ellos, el valor de transmitancia límite en cubiertas en contacto con el aire exterior ( $U_c$ ) establecido en el anejo E del DB-HE (véase tabla 2.12). Para los cálculos teóricos se considera la implantación de la cubierta en la ciudad de València, zona climática B (véase apartado 2.5.4.1). Por lo tanto, la transmitancia ( $U$ ) de todos los modelos estudiados es menor o igual a 0,33 W/m<sup>2</sup>k. En relación con el peso propio, se ha calculado en condiciones de saturación de agua de la cubierta, y, al igual que el coste de construcción de cada modelo, teniendo en cuenta el espesor de material aislante necesario en cada caso. Este estudio se detalla, debido a su amplitud, en el Anexo I.

Cabe destacar que la realización de este análisis de la transmitancia térmica, peso propio y coste de construcción es previo a la simulación energética con motores de cálculos especializados (EnergyPlus), con la intención de escoger 3 modelos para la construcción de las maquetas. Por lo tanto, el cálculo de la transmitancia térmica se ha llevado a cabo con valores aproximados y simplificados de conductividad térmica para el caso de las capas separadoras y, especialmente, de las capas de vegetación y substrato (con fenómenos complejos de transmisión de calor). Es por ello que, al emplear el programa de simulación energética, más preciso, sobre todo respecto a los fenómenos de transferencia de calor en las capas de vegetación y substrato (véase apartado 7.1), se han obtenido unos valores de transmitancia térmica de los sistemas constructivos de cubierta ajardinada diferentes a aquellos conseguidos mediante el cálculo teórico, además de variaciones en el espesor del material aislante. Esto se debe al margen de error introducido por las simplificaciones en el cálculo teórico realizado en este apartado, y detallado en el Anexo I. Este estudio tan solo se realiza para comparar entre sí las diferentes soluciones constructivas de los 16 modelos, por lo que la simplificación realizada se considera como suficiente en este estado de la investigación. Posteriormente, mediante la simulación energética (véase capítulo 7), se trabajará con valores más precisos.

<sup>1</sup> Los resultados de la investigación desarrollada en el apartado 6.1, en relación con el coste de construcción y peso propio de los diferentes modelos estudiados, han sido publicados como participación en el *5th International Scientific Conference on Economics and Management* (EMAN 2021) (Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., et al. 2021), en el XXXV Salón Tecnológico de la Construcción (EXCO'21) (Borràs, J.G., Mas, Á., Lerma, C., et al. 2021a) y como póster en la *International Itinerant Exhibition "Research in Building Engineering EXCO'21"* (Borràs, J.G., Mas, Á., Lerma, C., et al. 2021b).



### 6.1.1 Elección de modelos

Como se ha mencionado, todos los modelos han sido diseñados para cumplir el mismo valor límite de transmitancia de  $U_c = 0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ . La tabla 6.1 muestra una clasificación valorando su carga de peso propio (P) y coste de construcción (C), en base a los datos obtenidos y detallados en el Anexo I. Se ha valorado con la máxima puntuación el menor coste y el menor peso propio, hechos atrayentes a la hora de pensar en la cubierta ajardinada como una herramienta sostenible y competitiva en el campo de la rehabilitación.

MODELO	P TOTAL (kg/m <sup>2</sup> )	PUNTUACIÓN RELATIVA P	C TOTAL (€/m <sup>2</sup> )	PUNTUACIÓN RELATIVA C	PUNTUACIÓN TOTAL
Modelo 11	422,2	16	100,8	16	32
Modelo ref.	655,94	15	124,8	15	30
Modelo 6	775,5	13	164,7	14	27
Modelo 1	704,2	14	169,7	12	26
Modelo 5	855,0	11	172,8	11	22
Modelo 10	926,2	8	167,9	13	21
Modelo 12	838,6	12	189,5	9	21
Modelo 7	939,9	7	188,8	10	17
Modelo 14	918,6	9	190,0	8	17
Modelo 2	868,7	10	194,2	7	17
Modelo 8	1089,9	5	216,9	6	11
Modelo 3	1018,7	6	222,3	5	11
Modelo 13	1153,6	4	243,0	4	8
Modelo 15	1233,6	3	243,5	3	6
Modelo 9	1544,9	1	280,4	2	3
Modelo 4	1473,7	2	285,8	1	3

Tabla 6.1. Modelos ordenados por puntuación total, suma de la puntuación relativa a la carga de peso propio y al coste de construcción (Véase Anexo I).

De entre los 16 modelos se ha escogido, en primer lugar, el modelo de referencia (a partir de este momento: **modelo A**), como representante de una cubierta tradicional no ajardinada de amplia aplicación hasta el momento (Tabla 6.2 y Figura 6.1). De los modelos ajardinados se van a escoger dos sistemas con el mismo tipo de capa drenante. De acuerdo con esto, el modelo 1 (a partir de este momento: **modelo B**) es la cubierta ajardinada con capa drenante de paneles nodulares de material plástico con mejor puntuación (combinación de menor peso propio y menor coste) (Tabla 6.3 y Figura 6.2). El modelo 4 (a partir de este momento: **modelo C**) se ha escogido al tener la peor puntuación (combinación de mayor peso propio y mayor coste) (Tabla 6.4 y Figura 6.3). Ambas cubiertas cumplen el límite de transmitancia térmica para la zona climática B, por lo que un ensayo de estos tres modelos puede ofrecernos datos sobre el comportamiento térmico y energético de los dos modelos ajardinados (B y C) y condicionar el análisis de los resultados a su peso propio y coste, a la vez que se compara con el comportamiento de la cubierta tradicional (A). Podemos considerar que, pequeñas variaciones en el comportamiento térmico confirmarían que, con poco peso propio y coste de construcción, una cubierta ajardinada extensiva (modelo B) puede conseguir grandes beneficios térmicos y aplicarse en el campo de la rehabilitación de manera más competitiva.

En el caso de los modelos aquí escogidos para realizar las maquetas de ensayo, el modelo A necesitaría 8,5 cm de aislante XPS (es decir, casi el doble que el modelo B para la misma zona climática). En el caso del modelo B tan solo necesitaría 4,5 cm de aislante XPS, mientras que el modelo C ya cumple con el requisito de  $U_c$  sin la introducción de material aislante. Cabe destacar que este último modelo, aunque cumpla con la  $U_c$  sin necesidad de instalar material aislante, dispone de una capa de aislamiento térmico mínima de 3 cm, ya que se pueden producir puentes térmicos en el substrato, o variaciones de la conductividad térmica, en función de la cantidad de agua que almacene.



MODELO DE REFERENCIA – MODELO A					
Cubierta invertida con acabado de grava					
CAPAS		e (m)	R (m <sup>2</sup> K/W)	P (daN/m <sup>2</sup> )*	C (€/m <sup>2</sup> )
R <sub>se</sub>		-	0,040	-	-
9	Grava	0,060	0,030	108	6,68
8	Capa antipunzonante + filtrante	0,001	-	0,20	2,16
7	Aislante	0,085	2,576	2,72	8,81
6	Capa separadora química + antiadherente	0,001	-	0,12	2,38
5	Lámina impermeable	0,001	0,005	1,40	21,30
4	Mortero de regulación	0,015	0,012	28,50	26,28
3	Formación de pendientes	0,100	0,074	200	
2	Estructura soporte	0,250	0,280	300	48,75
1	Enlucido de yeso	0,015	0,038	15	8,44
R <sub>si</sub>		-	0,100	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>0,523</b>	<b>3,157</b>	<b>655,94</b>	<b>124,80</b>
<b>U TOTAL (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,317</b>		

\*Las unidades de la carga de peso propio son daN/m<sup>2</sup>. Se trata de una unidad de medida equivalente a kg/m<sup>2</sup>, pero en la cual la aceleración de la gravedad, para el paso de unidades de N a kg, se ha simplificado de 9,81 m/s<sup>2</sup> a 10 m/s<sup>2</sup>.

Tabla 6.2. Principales características del modelo de referencia: espesor (e), resistencia (R), transmitancia (U), carga de peso propio (P) y coste de construcción (C) (Véase Anexo I).

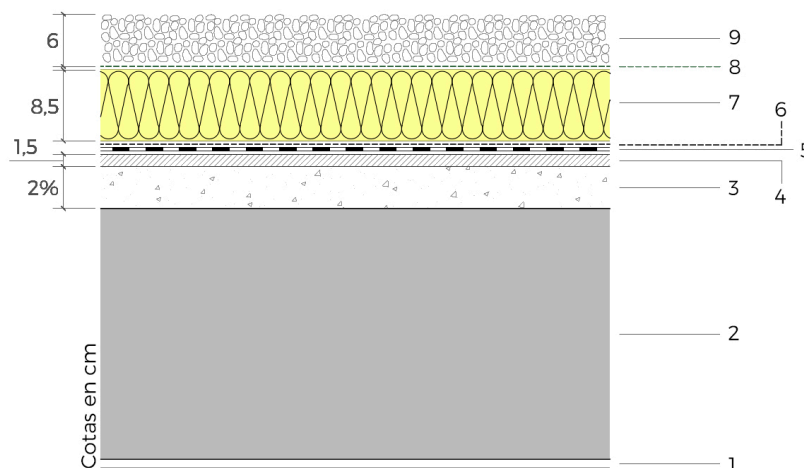


Figura 6.1. Detalle constructivo del modelo de referencia - modelo A.



MODELO 1 – MODELO B					
Cubierta ajardinada extensiva con capa drenante de paneles nodulares					
CAPAS		e (m)	R (m <sup>2</sup> K/W)	P (daN/m <sup>2</sup> )	C (€/m <sup>2</sup> )
R <sub>se</sub>		-	0,040	-	-
13	Vegetación	0,100	0,833	10	18,63
12	Substrato	0,100	0,192	140	14,19
11	Lámina filtrante	0,001	-	0,30	2,63
10	Capa drenante	0,040	0,121	6,90	11,88
9	Capa difusora de va por + sep. química	0,002	-	0,24	2,99
8	Aislante	0,045	1,364	1,44	5,78
7	Capa separadora química+ antiadherente	0,001	-	0,12	2,38
6	Lámina antiraíces	0,004	-	0,30	6,45
5	Lámina impermeable	0,001	0,005	1,40	21,30
4	Mortero de regulación	0,015	0,012	28,50	26,28
3	Formación de pendientes	0,100	0,074	200	
2	Estructura soporte	0,250	0,280	300	48,75
1	Enlucido de yeso	0,015	0,038	15	8,44
R <sub>si</sub>		-	0,100	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>0,672</b>	<b>3,059</b>	<b>704,20</b>	<b>169,70</b>
<b>U TOTAL (W/m<sup>2</sup>k)</b>			<b>0,327</b>		

Tabla 6.3. Principales características del modelo 1: espesor (e), resistencia (R), transmitancia (U), carga de peso propio (P) y coste de construcción (C) (Véase Anexo I).

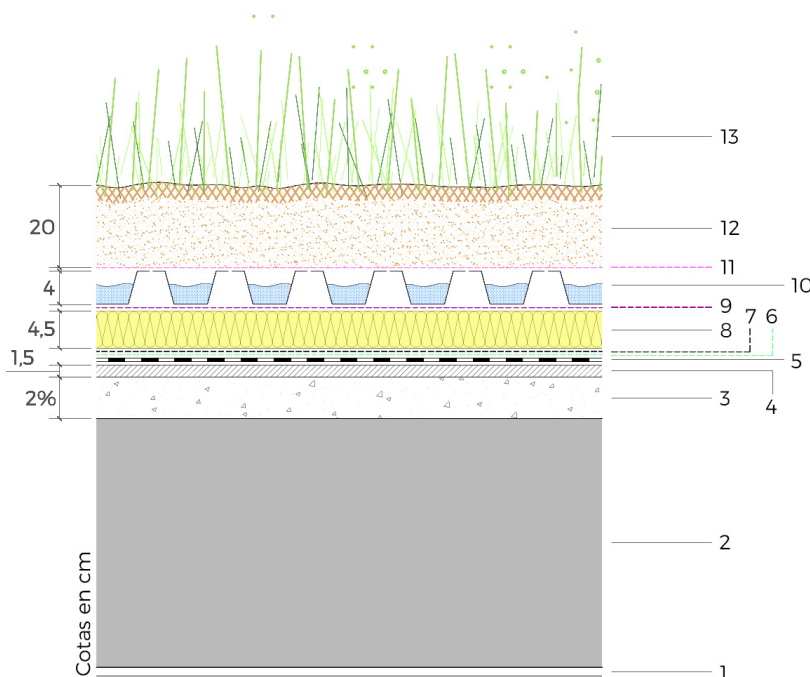


Figura 6.2. Detalle constructivo del modelo 1 - modelo B.



<b>MODELO 4 – MODELO C</b>					
Cubierta ajardinada intensiva con capa drenante de paneles nodulares					
<b>CAPAS</b>		<b>e (m)</b>	<b>R (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>P (daN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>C (€/m<sup>2</sup>)</b>
R <sub>se</sub>		-	0,040	-	-
13	Vegetación	0,600	5,000	20	47,10
12	Substrato	0,600	1,154	900	102,69
11	Lámina filtrante	0,001	-	0,30	2,63
10	Capa drenante	0,040	0,121	6,90	11,88
9	Capa difusora de vapor + sep. química	0,002	-	0,24	2,99
8	Aislante	0,030	0,909	0,96	4,91
7	Capa separadora química + antiadherente	0,001	-	0,12	2,38
6	Lámina antiraíces	0,004	-	0,30	6,45
5	Lámina impermeable	0,001	0,005	1,40	21,30
4	Mortero de regulación	0,015	0,012	28,50	26,28
3	Formación de pendientes	0,100	0,074	200	
2	Estructura soporte	0,250	0,280	300	48,75
1	Enlucido de yeso	0,015	0,038	15	8,44
R <sub>si</sub>		-	0,100	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>1,657</b>	<b>7,733</b>	<b>1473,72</b>	<b>285,80</b>
<b>U TOTAL (W/m<sup>2</sup>k)</b>			<b>0,129</b>		

Tabla 6.4. Principales características del modelo 4: espesor (e), resistencia (R), transmitancia (U), carga de peso propio (P) y coste de construcción (C) (Véase Anexo I).

Si se tiene en consideración una circunstancia de rehabilitación en la cual el forjado, el sistema de revestimiento del techo interior y la formación de pendientes, con el respectivo mortero de regulación, se encuentran en buenas condiciones, la nueva carga aportada sobre la estructura de cubierta por el cambio de sistema constructivo sería: 136,92 daN/m<sup>2</sup> para el modelo A, 160,7 daN/m<sup>2</sup> para el modelo B, y 930,2 daN/m<sup>2</sup> para el modelo C.

En primer lugar, es necesario hacer una aproximación al cálculo estructural de la cubierta de la vivienda a rehabilitar, en base a la normativa en vigor cuando se construyó el edificio, es decir, entre las décadas 1950-1960. Se trata de la Norma M.V. 101-1962 de Acciones en la Edificación, publicada en 1963 y primera normativa relativa al cálculo de estructuras en la edificación, y la Instrucción para el proyecto y la ejecución de obras de hormigón en masa o armado (EH-68), aprobada en 1968 y que introduce conceptos de mayoración de cargas sobre la estructura. En este contexto se consideraba que la sobrecarga de uso en una cubierta de acceso privado era de 150 kg/m<sup>2</sup>, y se debía mayorar por 1,5, resultando en 225 kg/m<sup>2</sup>. Por lo tanto, el sistema estructural de cubierta podría soportar una sobrecarga de hasta 225 kg/m<sup>2</sup>, quedando los modelos A y B por debajo de este límite. Además, se debe considerar que parte de las capas del sistema constructivo de la antigua cubierta retirarían, disminuyendo el peso propio de la cubierta sobre el forjado. En el caso del modelo C, el mayor espesor de substrato y peso de la vegetación implican un aumento de la carga muy por encima de los 225 kg/m<sup>2</sup>, por lo que, tras un estudio detallado para cada edificio o intervención, sería necesario realizar un refuerzo estructural<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., et al. 2022a.

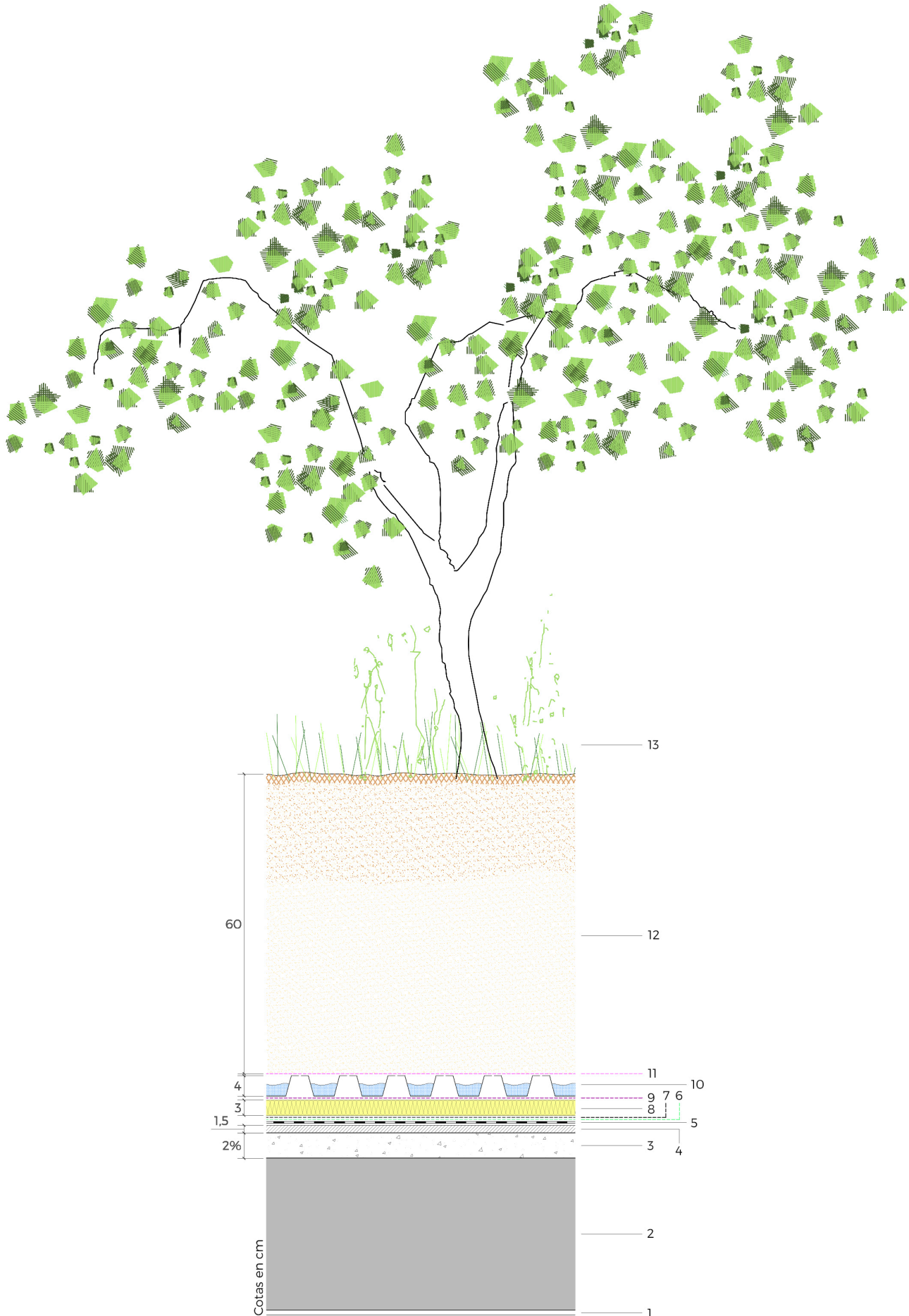


Figura 6.3. Detalle constructivo del modelo 4 - modelo C.





## 6.2 ELECCIÓN DE MATERIALES

A continuación, se detallan los materiales escogidos para la construcción de las maquetas de los modelos A, B y C.

### 6.2.1 Lámina impermeable

La elección del sistema de impermeabilización se ha centrado, no solo en emplear un material con las mejores prestaciones posibles, ya que todos los productos que se encuentran en el mercado actual muestran una tecnología muy avanzada, sino también en el objetivo principal hacia el que se tiene que orientar la sociedad actual: la sostenibilidad.

Con las metas de los ODS en el horizonte, cualquier construcción de obra nueva o rehabilitación debe considerar cuestiones importantes sobre el cuidado al medio ambiente. Y también las cubiertas ajardinadas, que pretenden convertir los tejados en soluciones no solo estéticas y sociales, sino también en espacios urbanos que recuperen el suelo natural perdido (Objetivo 11) a la vez que cuidan el entorno ambiental antes y durante su vida útil (Objetivo 13). En este sentido, se ha optado por el uso de láminas EPDM, no solo por su resistencia a las raíces, a los agentes atmosféricos o su gran elasticidad, sino principalmente por ser la solución más sostenible de las principales láminas impermeables comercializadas actualmente.

Un estudio encargado a una consultora independiente por parte de la *EPDM Roofing Association* realizó un análisis del ciclo de vida útil (LCA en inglés, *Life Cycle Assessment*) de diferentes cubiertas planas dispuestas con distintos tipos de materiales impermeabilizantes (EPDM, FPO, PVC y LBM), con distintos colores (blanco y negro/gris) y en distintos sistemas constructivos (no adherido, semiadherido y fijado mecánicamente)<sup>3</sup>. Este análisis evaluó diferentes categorías de impacto ambiental (de acuerdo con la herramienta TRACI -*Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts*- de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos *US Environmental Protection Agency*) destacando entre ellos el índice de Potencial de Calentamiento Global (GWP del inglés, *Global Warming Potential*), ya que mostraba los valores más representativos y cruciales de todas las categorías analizadas<sup>4</sup>. Este índice se mide en kg de CO<sub>2</sub> equivalente e indica, al igual que el concepto *Embodied Carbon* (véase apartado 3.1.2.4), las emisiones de CO<sub>2</sub> implicadas en el proceso de extracción de la materia prima, fabricación, transporte e instalación del material. Por lo tanto, este índice se encuentra a su vez relacionado con el concepto de *Embodied Energy* (cantidad de energía empleada en el proceso de extracción, fabricación, transporte e instalación), especialmente en países cuyas principales fuentes de energía no son carboneutralas (como es el caso de España, véase apartado 2.1). Así, el índice GWP se puede tomar como un factor relevante para analizar y estudiar la sostenibilidad de diferentes materiales, permitiendo hacer una comparativa justa entre ellos.

Para poder establecer esta comparativa entre diferentes materiales y sistemas de impermeabilización se consideró en el estudio una vida útil igual para todos los materiales. Es por ello que se decidió no integrar en el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante el uso y fin de la vida útil del material, además de que la repercusión del impacto ambiental de estas fases es muy baja en comparación al impacto ambiental producido durante la extracción, fabricación, transporte e instalación (Figura 6.4). Se asume, por lo tanto, que el estudio durante esta fase inicial aporta una visión precisa del impacto ambiental y la sostenibilidad de cada solución<sup>5</sup>.

Los diferentes sistemas de colocación afectaron levemente al índice GWP. En valores entorno a un 4 % en el caso de las láminas EPDM, por lo que no se consideran determinantes (Figura 6.5). Las diferencias entre láminas EPDM de color negro y blanco se mostraron más sustanciales, en parte debido a que el contenido de carbono negro es relativamente alto en el primer caso, y necesita un mayor aporte de energía para su fabricación que el dióxido de titanio y la arcilla blanca que se emplea en las láminas de color blanco<sup>6</sup>. Aun así, como la relevancia del color toma mayor importancia en cubiertas donde la lámina va a quedar expuesta

3 TEGNOS Research. 2010.

4 *Ibidem*.

5 *Ibidem*.

6 *Ibidem*.



(debido a absorciones del calor, temperaturas superficiales de la lámina y durabilidad), y en el caso de las cubiertas ajardinadas las láminas de EPDM no van a quedar expuestas, se han comparado entre sí solo los valores de láminas de color negro o gris oscuro.

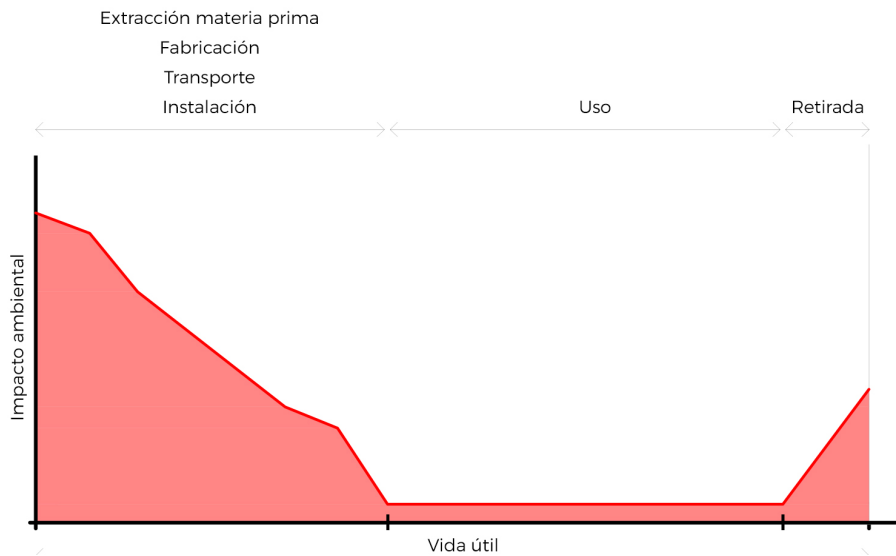


Figura 6.4. Impacto ambiental orientativo a lo largo de la vida útil de una cubierta.

En el siguiente gráfico (Figura 6.5) se indican los kg de CO<sub>2</sub> equivalente para los diferentes sistemas de colocación con láminas de EPDM de 1,5 mm de espesor no reforzada color negro; FPO de 1,5 mm de espesor color gris; PVC de 1,5 mm de espesor color gris y LBM de 3,5 mm de espesor color negro. Se puede observar que el sistema no adherido con lámina EPDM es el que muestra menor índice GWP, siendo aproximadamente un 8 % menor que las láminas semiadheridas de FPO, un 107 % menor que las láminas semiadheridas de PVC y un 289 % menor que en el caso de LBM adheridas.

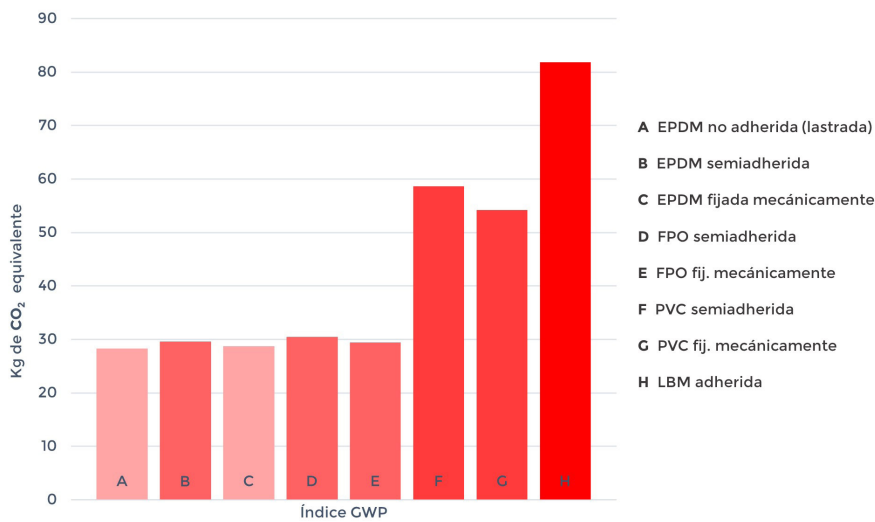


Figura 6.5. Índice GWP para las diferentes soluciones impermeabilizantes.

Estos valores bajos en el índice GWP se pueden explicar debido al bajo contenido de polímeros complejos en la composición de las láminas de EPDM, que son los que necesitan gran cantidad de petróleo (mayor consumo energético y generación de CO<sub>2</sub>) para formarse, y a su menor espesor. Las LBM, a pesar de contener también poca cantidad de polímeros complejos, su espesor de más del doble en comparación con una lámina EPDM, aumentan la energía necesaria y el CO<sub>2</sub> emitido<sup>7</sup>.

7 TEGNOS Research. 2010.



Como se ha comentado al principio, el estudio se ha realizado para una misma longitud de vida de todas las láminas. Si quisiéramos conseguir un GWP anual igual, por ejemplo, de 1,5 kg CO<sub>2</sub> eq., en cada una de las soluciones incluidas en el gráfico, las láminas de EPDM no adheridas necesitarían tener una vida útil de 19 años, mientras que las LBM ascenderían a una vida útil de 55 años aproximadamente<sup>8</sup>. Y en España, los fabricantes ofrecen, para ambas láminas, unas garantías que van desde los 10 a los 20 años.

A pesar de estos datos, cabe destacar que la vida útil de las láminas de EPDM llega más allá de los 20 años. Estudios realizados por la *EPDM Roofing Association* sobre cubiertas de 30 años de antigüedad mostraron que las propiedades de las láminas se habían mantenido por encima de los mínimos exigidos para su correcto funcionamiento. Además, en otro estudio realizado sobre láminas EPDM no adheridas instaladas 23 años antes, las propiedades de resistencia a tracción, alargamiento final y resistencia al desgarro permanecían sin cambios respecto a los valores iniciales de fábrica. Con ello se llega a concluir que la vida útil de las láminas EPDM puede llegar a alcanzar 40 años o más, siempre que haya un correcto mantenimiento<sup>9</sup>.

Si combinamos la larga vida útil que pueden llegar a tener las láminas de EPDM con el bajo índice GWP del sistema no adherido frente a otras opciones presentes en el mercado actual, podemos confirmar que la lámina EPDM es la solución más sostenible de las principales opciones que ofrece el mercado actual, y de ahí su uso en esta investigación eligiendo el sistema no adherido (también de acuerdo con lo indicado en la norma UNE 104416<sup>10</sup>).

Para la obtención de este producto, se ha colaborado con el Grupo CRIDA & Projects S.L., empresa de construcción ubicada en València. Se ha tenido en cuenta sus conocimientos en el campo de la construcción y nos han facilitado diferentes materiales necesarios para la realización de las maquetas, como la lámina impermeable EPDM de 1 mm de espesor.

### 6.2.2 Aislamiento térmico

En cuanto al material aislante térmico, la búsqueda del producto más adecuado se ha iniciado centrándose en aquellos materiales cuya comercialización se realiza habitualmente en España. Además, para que el producto sea apto para su uso en cubiertas planas no ventiladas<sup>11</sup>, como son las cubiertas ajardinadas, debe suministrarse en formato de panel. En la tabla 6.5 se recogen diferentes tipos de materiales aislantes térmicos junto con su posible uso en cubiertas planas convencionales o invertidas, su coste y su biodegradabilidad.

Con el uso de una cubierta invertida se produce una mejora en la durabilidad de la lámina impermeable, ya que esta se encuentra bajo la capa de material aislante y está sometida a menores variaciones de temperatura a lo largo del día, disminuyendo también las máximas y mínimas temperaturas que alcanza en su superficie (véase apartado 3.1.2.3). Por lo tanto, de la tabla 6.5 se van a escoger tan solo los materiales aislantes que pueden ser empleados en cubiertas planas no ventiladas invertidas.

Por otro lado, los materiales aislantes empleados en las cubiertas invertidas ajardinadas deben cumplir una serie de valores de acuerdo con la norma UNE 104401<sup>12</sup> (Tabla 6.6). Los requisitos establecidos, de acuerdo con esta normativa, son los siguientes:

- **Resistencia mínima a la compresión CS(10/Y) $\times$ <sup>13</sup>** (en kPa): el menor valor para la tensión de compresión a una deformación del 10 % o la resistencia a compresión, el que resulte menor de los dos. Por ejemplo, un nivel CS(10/Y)300 implica un requisito de resistencia mínima a compresión  $\geq$  300 kPa.

8 TEGNOS Research. 2010.

9 EPDM Roofing Association (ERA). 2010; Manso, M., Teotónio, I., Silva, C.M., *et al.* 2021.

10 AENOR. 2009.

11 IVE. 2011.

12 AENOR. 2013a.

13 AENOR. 2013b.



- **Deformación máxima bajo carga y temperatura  $DLT(x)5^{14}$  (en %)**: el nivel de deformación bajo condiciones concretas de compresión y de temperatura durante un determinado periodo de tiempo, habiendo tres niveles:  $DLT(1)5$ ,  $DLT(2)5$  y  $DLT(3)5$ . El que aquí interesa, por ser el necesario para cubiertas planas invertidas, es el  $DLT(2)5$ , cuyas condiciones de carga son 20 kPa, temperatura  $(80 \pm 1) ^\circ C$  Y tiempo  $(48 \pm 1)$  h, con una deformación menor o igual al 5 %.
- **Absorción de agua por inmersión  $WL(T)x^{15}$  (en %)**: el agua absorbida determinada por el cambio de masa de la probeta de ensayo, tras estar completamente sumergida en agua durante 28 días. Por ejemplo, un nivel  $WL(T)0,7$ , el requerido en el caso de las cubiertas invertidas, implica una absorción de agua  $\leq 0,7$  %.
- **Absorción de agua por difusión  $WD(V)x^{16}$  (en %)**: el agua absorbida determinada por el aumento de masa de una probeta de ensayo expuesta a una diferencia de presión de vapor de agua y a un gradiente de temperatura durante un periodo de tiempo de 28 días. El límite de agua absorbida dependerá del espesor nominal de la probeta, considerando que, por ejemplo, en un nivel  $WD(V)3$ , especificado para todas las cubiertas invertidas, con una probeta de espesor nominal 50 mm, la absorción deberá ser menor o igual al 3 %, para un espesor de 100 mm será  $\leq 1,5$  % y para 200 mm  $\leq 0,5$  %.
- **Resistencia a la congelación-descongelación  $FTx^{17}$  (en %)**: la capacidad para resistir 300 ciclos repetidos de humedecimiento a  $20 ^\circ C$  seguido de congelación en condiciones secas a  $-20 ^\circ C$ , determinada por la cantidad de agua absorbida y la variación de la resistencia a compresión. Por ejemplo, el nivel FT2 requerido para las cubiertas invertidas implica absorciones de agua y variaciones de la resistencia a compresión iguales o inferiores al 1 %.

TIPO DE AISLANTE	USO EN CUBIERTAS PLANAS NO VENTILADAS		BIODEGRADABLE	COSTE (€/m <sup>2</sup> )
	Convencional	Invertida		
Lana de roca (SW)	Sí	Sí	No	< 5
Lana de vidrio (GW)	Sí		No	< 5
Poliestireno expandido (EPS)	Sí (EPS de alta densidad)	Sí	No	< 5
Poliestireno extruido (XPS)	Sí	Sí	No	< 15
Poliuretano (PUR)	Sí	Sí	No	< 10
Vidrio celular (CG)	Sí	Sí	Sí	< 60
Virutas de madera (WF)	Sí		Sí	< 40
Corcho (ICB)	Sí	Sí	Sí	< 25
Cáñamo (HM)			Sí	< 25
Celulosa (CL)			Sí	< 25
Lino (FLX)			Sí	< 25

Tabla 6.5. Tipo de materiales aislantes térmicos y su uso en cubiertas planas no ventiladas.

De acuerdo con las tablas 6.5 y 6.6 se determinará a continuación cuál es el material aislante más adecuado para su uso en cubiertas ajardinadas invertidas, considerando su elección siempre en formato de panel, tal como se ha indicado.

14 AENOR. 2013d.

15 AENOR. 2013e.

16 AENOR. 2013f.

17 AENOR. 2013g.



USOS	RES. MÍNIMA COMPRESIÓN (kPa)	DEF. MÁXIMA BAJO CARGA Y TEMPERATURA (%)	ABSORCIÓN AGUA POR INMERSIÓN (%)	ABSORCIÓN AGUA POR DIFUSIÓN (%)	RES. CONGELACIÓN-DESCONGELACIÓN (%)
Transitable peatones	CS(10/Y)300	DLT(2)5	WL(T)0,7	WD(V)3	FT2
Transitable espacios públicos y deportivos	CS(10/Y)300				
Tráfico de vehículos	CS(10/Y)500				
No transitable	CS(10/Y)300				
Ajardinada	CS(10/Y)300				

\*\* En cubiertas ajardinadas con substratos de gran espesor se revisarán estos valores en función de la carga.

Tabla 6.6. Requisitos del material aislante térmico en cubiertas planas invertidas.

En relación con la **lana de roca (SW)**, esta puede llegar a alcanzar, por ejemplo, valores de resistencia a compresión de hasta 500 o 700 kPa<sup>18</sup> y se trata de un material hidrófobo (que no absorbe agua). Gracias a esta última propiedad se ha comprobado que, aunque la lana de roca quede empapada de agua (como puede ocurrir en una cubierta invertida), su funcionamiento aislante no se verá alterado una vez haya vuelto a secarse<sup>19</sup>. Pero no se asegura que, mientras permanece inundada o humedecida, mantenga su capacidad aislante sin alteraciones, por lo que, en una cubierta ajardinada, donde prevalece el almacenamiento de humedad en el substrato y capas inferiores para asegurar el crecimiento y desarrollo de la vegetación, la lana de roca no parece ser la mejor opción.

Respecto al **poliestireno expandido (EPS)**, el valor de resistencia mínima a compresión se sitúa en 65 kPa, pudiendo llegar a alcanzar valores en torno a 150 kPa en el caso de productos de EPS mejorados<sup>20</sup>. Con estos valores no se alcanza el mínimo de 300 kPa requerido por la normativa, descartando este material para su uso como material aislante en una cubierta invertida ajardinada.

El **poliestireno extruido (XPS)** puede alcanzar los siguientes valores, incluso en paneles de poco espesor (3 cm)<sup>21</sup>, cumpliendo con los requisitos determinados en la tabla 6.6:

- Resistencia mínima a compresión: 300 kPa ( $\geq 300$  kPa).
- Comportamiento a la deformación:  $\leq 5$  %.
- Absorción de agua a largo plazo por inmersión: 0,2 % ( $\leq 0,7$  %).
- Absorción de agua a largo plazo por difusión: 3% ( $\leq 3$  %).
- Resistencia a ciclos de congelación-descongelación:  $\leq 1$  %.

Los valores de los paneles de **espuma rígida de poliuretano (PUR)**, sin revestimiento o su uso en paneles sándwich, no permiten cumplir con los valores límite mencionados previamente. Su resistencia a compresión puede alcanzar valores en torno a los 290 kPa para densidades específicas de 55 kg/m<sup>3</sup>, siendo los valores de resistencia a compresión mucho menores en el caso de densidades inferiores. También presenta una absorción de agua por inmersión que puede llegar a ser del 2,4 %, muy lejos de cumplir con el límite de 0,7 %<sup>22</sup>. De acuerdo con estos valores, los paneles de espuma de poliuretano también quedan descartados.

18 Dicon. 2022.

19 ROCKWOOL Peninsular. 2020.

20 Dicon. 2022.

21 *Ibidem*.

22 IDAE. 2007.



Se plantea también la opción de emplear materiales más sostenibles, como podrían ser en este caso el vidrio celular o el corcho (Tabla 6.5), debido a su biodegradabilidad o su menor coste energético (frente a los 75-125 MJ/kg del poliestireno extruido, el coste energético del vidrio celular es de entre 10-75 MJ/Kg y el del corcho se sitúa entre el 1-25 MJ/kg<sup>23</sup>).

El **vidrio celular** (CG) presenta, entre otras características, una resistencia a compresión cercana a 800 kPa y valores de absorción de agua del 0 %, por lo que podría valorarse su uso como aislamiento en cubiertas planas invertidas ajardinadas<sup>24</sup>.

El **corcho** (ICB), en cambio, puede soportar cargas de compresión de valores en torno a 490 kPa, pero para densidades normales de productos empleados en la construcción (105-130 kg/m<sup>3</sup>)<sup>25</sup> se desaconseja que se someta a una tensión de compresión que superen de forma continuada los 290-300 kPa, por lo que no cumple con el requisito CS(10/Y)300. Además, presenta valores de absorción de agua por inmersión del 3 %, valor que supera el límite establecido por el requisito WL(T)0,7<sup>26</sup>. De acuerdo con estos datos, tampoco se considera un material idóneo para su uso en cubiertas invertidas ajardinadas.

Por lo tanto, de lo anteriormente justificado, se concluye que se podrían emplear el poliestireno extruido (XPS) y el vidrio celular (CG) como materiales aislantes en cubiertas planas invertidas ajardinadas. De acuerdo con la tabla 6.5, y considerando el factor del coste como variable en este estudio, el vidrio celular presenta un coste por metro cuadrado 4 veces mayor que el poliestireno extruido. Es por ello que, finalmente, se ha optado por emplear paneles de poliestireno extruido, ya que cumplen con los requisitos técnicos para su uso en una cubierta invertida ajardinada, además de ajustarse a las necesidades económicas requeridas en este estudio. Asimismo, dentro del campo de la rehabilitación, en muchas ocasiones se puede reutilizar el aislante existente en una cubierta, cambiando la lámina impermeable (en función de su estado) y el acabado de la cubierta (en este caso a un sistema ajardinado). De los dos aislantes posibles (XPS y CG), el poliestireno extruido ha sido empleado más ampliamente, tradicionalmente, como material aislante, especialmente en la zona de València, por lo que parece ser la opción más adecuada también considerando este factor dentro del proyecto de rehabilitación.

Los diferentes paneles aislantes de XPS, del espesor necesario para cada modelo, se han obtenido a través del Grupo CRIDA. En este caso, se ha trabajado con los espesores más habituales en el campo de la construcción y que, por lo tanto, la empresa disponía de ellos. Los espesores de material que se han considerado en la parte inicial de planteamiento de los modelos han sufrido ajustes. En el caso del modelo A, el espesor inicial de material aislante necesario era de 8,5 cm. Con un espesor de 8 cm se conseguía, de acuerdo a los cálculos de transmitancia térmica realizados, una transmitancia total de la cubierta de 0,33 W/m<sup>2</sup>K. Este es el valor límite establecido por normativa para una cubierta en zona térmica B (València). Se propone inicialmente aumentar el aislamiento a 8,5 cm para obtener una transmitancia por debajo del valor límite. Aun así, en el momento de proyectar las maquetas, no se disponía de paneles aislantes de más de 8 cm de espesor, por lo que se opta por emplear paneles aislantes de XPS de 8 cm de espesor, situándose la transmitancia de la cubierta en el valor límite, como se ha indicado. En el caso del modelo B, al tratarse de un espesor inicial de 4,5 cm ha sido necesario redondear, por lo que se ha dispuesto en las maquetas un panel aislante de 5 cm de espesor. Por último, en el modelo C, no se disponían de paneles de XPS de espesor menor a 4 cm, por lo tanto, el espesor inicial de 3 cm ha pasado a 4 cm en el montaje de las maquetas.

### 6.2.3 Substrato

Para la ejecución de las maquetas, se ha colaborado con la empresa ZinCo Cubiertas Ecológicas S.L., la cual dispone de una amplia experiencia en la instalación de cubiertas ajardinadas y cuyos productos presentan buenas prestaciones, corroboradas tanto por ensayos como por la aplicación en muchos proyectos. En este caso, se han mantenido diferentes conversaciones con la sede de esta empresa en Madrid, culminando

23 IVE. 2011.

24 IDAE. 2007.

25 Ibídem.

26 Fernández, L.V. 1977.



estas en una cooperación directa mediante el suministro de diferentes materiales para la construcción de las maquetas.

Entre estos materiales, se encuentran los sustratos, habiéndose empleado dos tipos diferentes en función del sistema de cubierta y las necesidades de retención de agua. Los dos productos empleados son ZincoTerra “Floral”, que la empresa recomienda especialmente para ajardinamientos extensivos, y ZincoTerra “Jardín”, adecuado para cubiertas intensivas. En ambos casos, el sustrato está compuesto por una mezcla de materia inorgánica y orgánica: cerámica triturada y otros componentes minerales (comercialmente llamada Zincolit), compost vegetal (comercialmente llamado Zincohum) y turba rubia.

La norma NTJ 11C recoge los valores recomendados por la FLL que debería de cumplir el sustrato escogido<sup>27</sup>, ya que existe muy poca información por el momento sobre las características de los sustratos para cubiertas ajardinadas en el clima mediterráneo. En la tabla 6.7 se resumen algunos de los valores recomendados en esta normativa, comparándolos con los valores que el fabricante aporta sobre los sustratos ZincoTerra “Floral” y ZincoTerra “Jardín”. Como se puede observar, se cumplen todos los puntos establecidos, considerando adecuados estos productos como sustrato para las maquetas de cubierta.

PROPIEDADES	VALORES RECOMENDADOS		VALORES ZINCO-TERRA “FLORAL”	VALORES ZINCO-TERRA “JARDÍN”
	Extensivas	Intensivas	Extensivas	Intensivas
Densidad en seco (gr/cm <sup>3</sup> )	-	-	1,1	1,0
Densidad saturado de agua (gr/cm <sup>3</sup> )	-	-	1,4	1,5
Máxima capacidad de agua (%)	≥ 35 ≤ 65	≥ 45	40	50
Permeabilidad al agua K <sub>f</sub> (mm/min)	0,6 - 70	0,3 - 30	0,6 - 70	0,3 - 30
Valor pH	6 - 8,5	6 - 8,5	6,5 - 8	6,5 - 8
Contenido en materia orgánica (gr/L)	≤ 65	≤ 90	< 65	< 90

Tabla 6.7. Propiedades del sustrato: valores recomendados y características de los sustratos empleados en los modelos.

## 6.2.4 Vegetación

### 6.2.4.1 Modelo B

Como se ha comentado los apartados 4.1.11.1 y 4.2.6, las especies del género *sedum* se consideran unas de las más adecuadas para su instalación en cubiertas ajardinadas extensivas. Esto se debe a sus raíces poco profundas, su elevada capacidad de almacenamiento de agua, de regulación de apertura de los estomas y de consumo de agua en función de la disponible en cada momento. En muchos casos, puede no tratarse de vegetación local, por lo que en este caso se han empleado especies de *sedum* adaptadas al entorno del emplazamiento (Figura 6.6, 6.7 y 6.8), ya que en la norma NTJ 11C aparecen como especies vegetales aptas para cubiertas extensivas y semiintensivas en clima mediterráneo costero<sup>28</sup> (véase tabla 4.15). Esta elección se ve respaldada ya que las especies y variedades de *sedum* escogidas se han empleado en el ajardinamiento del Parque Central de València, que destaca por el uso y desarrollo de especies autóctonas generando diferentes ecosistemas dentro del mismo jardín. Además, Coma *et al.*<sup>29</sup>, en sus modelos de cubierta ajardinada extensiva (5 cm de espesor de sustrato) en Puigverd (Lleida, España), comprobaron que las especies *sedum album* y *sedum suprium* mostraron un buen comportamiento en el clima mediterráneo cálido, alcanzando

27 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

28 *Ibidem*.

29 Coma, J., Pérez, G., Solé, C., *et al.* 2016.



buenas coberturas y una correcta resistencia. A continuación, se indican las características de cada una de las especies de *sedum* escogidas (Tabla 6.8, 6.9 y 6.10).

<b>SEDUM ALBUM</b>	
Nombre común	Uva cana, <i>Sedum</i> o Uva de gato <sup>30</sup>
Familia	Crassulaceae <sup>31</sup>
Género	<i>Sedum</i> <sup>32</sup>
Grupo (de acuerdo con la NTJ 11C)	Suculenta
Distribución geográfica	Pluriregional, original de Europa, Asia y el norte de África <sup>33</sup>
Hábitat	Zonas rocosas; tapizante de taludes, en zonas expuestas al sol y suelos bien drenados <sup>34</sup>
Altura	5-10 cm <sup>35</sup>
Floración	Abril – Mayo – Junio – Julio – Agosto (- Septiembre) <sup>36</sup>
Consideraciones para las cubiertas ajardinadas	Desarrollo lento, pero tienen capacidad de cubrición. La capa de aire entre la vegetación y el substrato es mínima. El aporte de riego se centra en primavera y verano, esperando a que el substrato esté completamente seco. Resisten bien heladas bajo cero, siempre que sean periodos cortos y altas temperaturas en verano, propio del clima mediterráneo <sup>37</sup>

Tabla 6.8. Características del *Sedum album*.

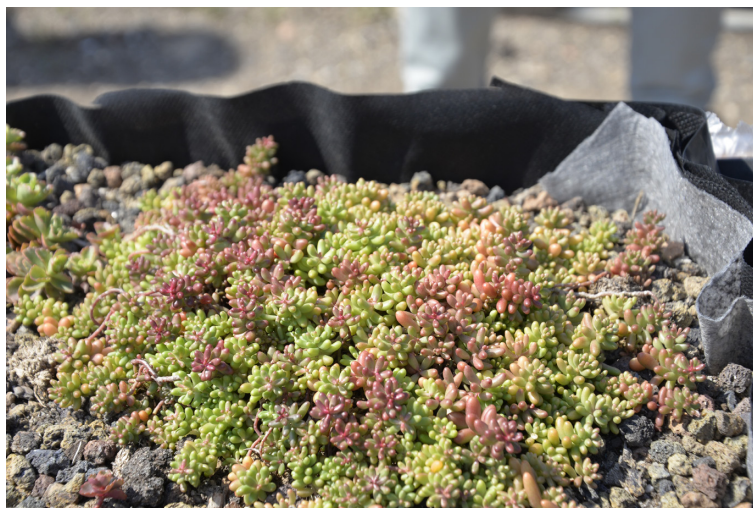


Figura 6.6. *Sedum album*.

30 Consulta plantas. 2022.

31 Ibídem.

32 Ibídem.

33 Ibídem.

34 Ibídem.

35 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

36 Consulta plantas. 2022.

37 ClubSuculentas. 2022; Consulta plantas. 2022.





<b>SEDUM SPURIUM</b>	
Nombre común	Sedo bastardo <sup>38</sup>
Familia	Crassulaceae <sup>39</sup>
Género	<i>Sedum</i> <sup>40</sup>
Grupo (de acuerdo con la NTJ 11C)	Suculenta / Vivaz
Distribución geográfica	Pluriregional, original del Cáucaso <sup>41</sup>
Hábitat	Zonas rocosas; tapizante en zonas secas y expuestas al sol y suelos bien drenados <sup>42</sup>
Altura	5-15 cm <sup>43</sup>
Floración	Junio – Julio – Agosto (- Septiembre) <sup>44</sup>
Consideraciones para las cubiertas ajardinadas	Desarrollo rápido y crecimiento ramificado. La capa de aire entre la vegetación y el substrato es mínima. El aporte de riego se centra en primavera y verano, esperando a que el substrato esté completamente seco. Resisten bien heladas bajo cero, siempre que sean periodos cortos y altas temperaturas en verano, propio del clima mediterráneo <sup>45</sup>

Tabla 6.9. Características del *Sedum spurium*.Figura 6.7. *Sedum spurium*.

38 Consulta plantas. 2022.

39 Ibídem.

40 Ibídem.

41 Ibídem.

42 Ibídem.

43 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

44 Consulta plantas. 2022.

45 Consulta plantas. 2022; Plantas y flores. 2021.



<b>SEDUM SPURIUM VAR. COCCINEUM</b>	
Nombre común	Sedo bastardo <sup>46</sup>
Familia	Crassulaceae <sup>47</sup>
Género	<i>Sedum</i> <sup>48</sup>
Grupo (de acuerdo con la NTJ 11C)	Suculenta / Vivaz
Distribución geográfica	Pluriregional, original del Cáucaso <sup>49</sup>
Hábitat	Zonas rocosas y como tapizante en zonas secas y expuestas al sol y suelos bien drenados <sup>50</sup>
Altura	5-15 cm <sup>51</sup>
Floración	Junio – Julio – Agosto (- Septiembre) <sup>52</sup>
Consideraciones para las cubiertas ajardinadas	Coloración de las hojas rosa/malva, especialmente con aumento del frío y/o sequía. Desarrollo rápido y crecimiento ramificado. La capa de aire entre la vegetación y el substrato es mínima. El aporte de riego se centra en primavera y verano, esperando a que el substrato esté completamente seco. Resisten bien heladas bajo cero, siempre que sean periodos cortos y altas temperaturas en verano, propio del clima mediterráneo <sup>53</sup>

Tabla 6.10. Características del *Sedum spurium* var. *coccineum*.



Figura 6.8. *Sedum spurium* var. *coccineum*.

Se escoge, por lo tanto, los tamaños iniciales de maceta que se indican a continuación, con una distribución en planta de acuerdo con las figuras 6.9 y 6.10. No se opta por la plantación de semillas ya que, como se ha observado en otras investigaciones, la cobertura es menor y la mortalidad mayor, especialmente si la vegetación no llega a adaptarse al entorno antes de la llegada del verano, por lo general cálido y sin preci-

46 Carex viviers. 2022.

47 Ibídem.

48 Ibídem.

49 Ibídem.

50 Ibídem.

51 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

52 Carex viviers. 2022.

53 Ibídem.



pitaciones en el clima mediterráneo<sup>54</sup>. De acuerdo con sus características tapizantes, se escogen un total de 17 unidades. Una vez realizada la instalación de la vegetación se procede a un riego saturando la capacidad de retención de agua del sustrato<sup>55</sup>.

- *Sedum album*: 6 ud. / Ø 13 cm.
- *Sedum spurium*: 5 ud. / Ø 13 cm.
- *Sedum spurium var. coccineum*: 6 ud. / Ø 13 cm.

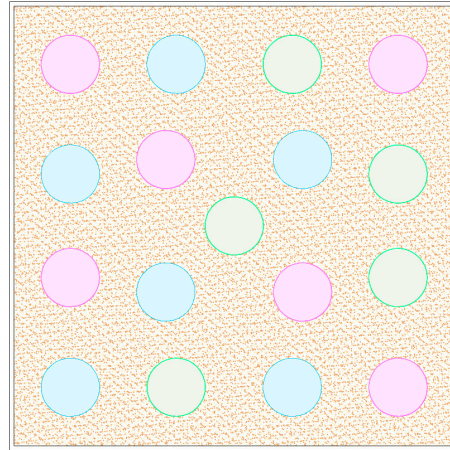


Figura 6.9. Distribución de las especies y variedades en el modelo B.

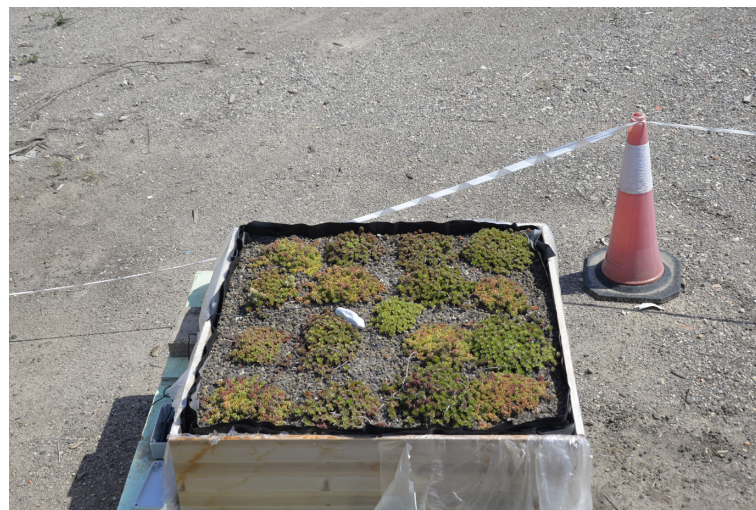


Figura 6.10. Especies y variedades en el modelo B: estado a 10/06/2021.

#### 6.2.4.2 Modelo C

Se toman como punto de referencia las investigaciones de Vestrella<sup>56</sup> sobre especies vegetales instaladas en cubiertas ajardinadas y adaptadas al clima mediterráneo, planteando en base a ellas la elección de vegetación para los modelos experimentales (Figura 6.11, 6.12 y 6.13). Estas especies, además, aparecen como aptas para cubiertas extensivas y semiintensivas para el clima mediterráneo costero en la norma NTJ 11C<sup>57</sup> (véase tabla 4.15). Se han escogido las siguientes especies, cuyas características y conclusiones extraídas de la investigación de Vestrella se indican a continuación (Tabla 6.11, 6.12 y 6.13).

54 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N. 2021; Van Mechelen, C., Dutoit, T., Hermy, M. 2015.

55 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

56 Vestrella, A. 2016.

57 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.



<b>ARMERIA MARÍTIMA</b>	
Nombre común	Armeria, Clavelina de mar, Césped de España o Gazón de España <sup>58</sup>
Familia	Plumbaginaceae <sup>59</sup>
Género	Armeria <sup>60</sup>
Grupo (de acuerdo con la NTJ 11C)	Herbácea perennifolia
Distribución geográfica	Cuenca mediterránea y Norteamérica <sup>61</sup>
Hábitat	Prados secos y zonas rocosas <sup>62</sup>
Altura	5-40 cm <sup>63</sup>
Floración	Junio – Julio – Agosto (- Septiembre) <sup>64</sup>
Consideraciones para las cubiertas ajardinadas	Desarrollo lento, pero constante (sin variaciones estacionales). Una baja cobertura, pero una baja mortalidad en los veranos cálidos y los picos fríos en invierno. Necesita un aporte mínimo de riego <sup>65</sup>

Tabla 6.11. Características de la *Armeria marítima*.



Figura 6.11. *Armeria marítima*.

58 Consulta plantas. 2022.

59 Ibídem.

60 Ibídem.

61 Ibídem.

62 Associació Flora Catalana. 2018.

63 Ibídem.

64 Ibídem.

65 Vestrella, A. 2016.



<b>SANTOLINA CHAMAECYPARISSUS</b>	
Nombre común	Abrotano hembra, Cipresillo, Escoba mujeriega, Guardarropa o Manzanilla <sup>66</sup>
Familia	Asteraceae <sup>67</sup>
Género	Santolina <sup>68</sup>
Grupo (de acuerdo con la NTJ 11C)	Subarbusciva (perenne)
Distribución geográfica	Mediterráneo occidental <sup>69</sup>
Hábitat	Prados secos y caminos, rocalla y taludes soleados <sup>70</sup>
Altura	10-50 cm <sup>71</sup>
Floración	Junio – Julio – Agosto - Septiembre <sup>72</sup>
Consideraciones para las cubiertas ajardinadas	(Se considera el comportamiento mencionado para la <i>Santolina rosmarinifolia</i> , especie “hermana” y de comportamiento muy similar) Crecimiento constante (sin variaciones estacionales) y con reducidas variaciones de cobertura. Una baja mortalidad. No requiere riego <sup>73</sup>

Tabla 6.12. Características de la *Santolina chamaecyparissus*.Figura 6.12. *Santolina chamaecyparissus*.

66 Associació Flora Catalana. 2018.

67 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

68 Consulta plantas. 2022.

69 Ibídem.

70 Associació Flora Catalana. 2018; Consulta plantas. 2022.

71 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

72 Associació Flora Catalana. 2018.

73 Vestrella, A. 2016.



<b>THYMUS VULGARIS</b>	
Nombre común	Estremoncello, Tomillo, Tomillo común o Tomillo salsero <sup>74</sup>
Familia	Lamiaceae <sup>75</sup>
Género	Thymus <sup>76</sup>
Grupo (de acuerdo con la NTJ 11C)	Subarbusciva (perenne)
Distribución geográfica	Mediterráneo occidental <sup>77</sup>
Hábitat	Matorrales y laderas soleadas <sup>78</sup>
Altura	15-30 cm <sup>79</sup>
Floración	Febrero – Marzo – Abril - Mayo – Junio (– Julio) <sup>80</sup>
Consideraciones para las cubiertas ajardinadas	(Se considera el comportamiento mencionado para la <i>Thymus serpyllum</i> , especie “hermana” y de comportamiento muy similar, aunque el <i>Thymus vulgaris</i> es más autóctono de la cuenca mediterránea) Muy resistente en plantaciones de diversas especies (multicultivo). Niveles de cobertura muy altos, pero con variaciones estacionales. Necesitan dosis mínimas de riego <sup>81</sup>

Tabla 6.13. Características del *Thymus vulgaris*.



Figura 6.13. *Thymus vulgaris*.

Se escoge, por lo tanto, los tamaños iniciales de maceta que se indican a continuación, con una distribución en planta de acuerdo con la figura 6.14 y 6.15. Debido a la baja cobertura reportada por Vestrella en la especie *Armeria marítima*, se opta por poner mayor cantidad de plantas iniciales. Al igual que en el modelo anterior, una vez realizada la instalación de la vegetación se procede a un riego saturando la capacidad de retención de agua del substrato<sup>82</sup>.

74 Associació Flora Catalana. 2018.

75 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

76 Associació Flora Catalana. 2018.

77 Ibídem.

78 Associació Flora Catalana. 2018; Consulta plantas. 2022.

79 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

80 Associació Flora Catalana. 2018.

81 Vestrella, A. 2016.

82 Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.



- *Armeria marítima*: 14 ud. / Ø 11 cm.
- *Santolina chamaecyparissus*: 4 ud. / Ø 18 cm.
- *Thymus vulgaris*: 4 ud. / Ø 18 cm.

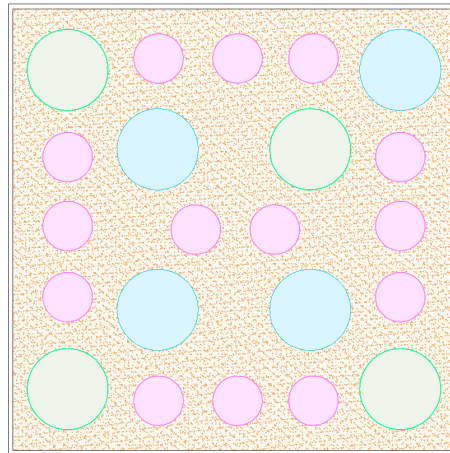


Figura 6.14. Distribución de las tres especies en el modelo C.



Figura 6.15. Especies y variedades en el modelo C: estado a 10/06/2021.

### 6.2.5 Otras capas

Respecto al resto de capas de los modelos construidos, la elección de materiales se ha realizado en base a varios aspectos. En primer lugar, la ubicación de las maquetas dentro del campus de la UPV, junto a la Ciudad Politécnica de la Innovación (CPI), en un espacio habilitado por el Servicio de Infraestructuras. Al realizarse el montaje y la monitorización durante un año en una localización cedida por la organización de la UPV se ha intentado minimizar el espacio ocupado y el peso de los sistemas. La posibilidad de sufrir desplazamientos a otras ubicaciones una vez pasado el periodo de monitorización ha influenciado, por ejemplo, a la hora de escoger una capa drenante de paneles nodulares, capaz de almacenar mayor cantidad de agua en menor altura y peso en comparación con los materiales granulares. Por otro lado, la facilidad de montaje, rapidez en el proceso, así como simplificación de los modelos ha determinado que se emplee el mismo tipo de material para cada capa en cada uno de los tres modelos, facilitando la comparativa entre ellos. Además, se ha puesto en valor el estudio realizado sobre las propiedades y materialidad de las diferentes capas (véase apartado 4.1) y el apoyo y la experiencia en instalación de cubiertas ajardinadas prestada por la empresa ZinCo Cubiertas Ecológicas S.L.

A continuación, se detalla la materialidad de cada una de las capas, así como el nombre comercial del producto utilizado (Tabla 6.14).



CAPA	MATERIALIDAD	NOMBRE COMERCIAL
Lámina antiraíces	Polietileno (PE) con masa aprox. 320 gr/m <sup>2</sup>	<i>Lámina antiraíces WSF 40</i>
Capa separadora por incompatibilidad química + antiadherente	Polipropileno (PP) con masa aprox. 80 gr/m <sup>2</sup>	<i>Lámina de separación TGV-21</i>
Capa separadora por incompatibilidad química + difusora de vapor	Polipropileno (PP) con masa aprox. 80 gr/m <sup>2</sup>	<i>Lámina de separación TGV-21</i>
Capa separadora retenedora de humedad	Mezcla de Poliéster (P) y Polipropileno (PP) con masa aprox. 470 gr/m <sup>2</sup> y capacidad de retención de agua aprox. 5 L/m <sup>2</sup>	<i>Manta protectora y retenedora SSM 45</i>
Capa drenante	Paneles nodulares de poliolefina reciclada (ppal. PE) Volumen de llenado aprox. 17 L/m <sup>2</sup> y altura aprox. 4 cm	<i>Floradrain FD 40-E</i>
Lámina filtrante	Polipropileno (PP) con masa aprox. 100 gr/m <sup>2</sup>	<i>Filtro sistema SF</i>
Grava	Cantos rodados de diámetro 2-4 cm	

Tabla 6.14. Materialidad y nombre comercial de las diferentes capas empleadas en los modelos A, B y C.

### 6.2.6 Sistema de riego

El cambio climático presenta, como se ha indicado anteriormente, una serie de problemas medioambientales, económicos y sociales que afectan al desarrollo de las personas. Uno de ellos es el aumento de la diferencia entre zonas y épocas secas y húmedas<sup>83</sup>. España es, actualmente, uno de los grandes países europeos con mayor índice de estrés hídrico. De acuerdo con las previsiones actuales para los años entre 2011 y 2040, un 56,2 % de la superficie del país está en riesgo de desertización<sup>84</sup>. En la década de 2010 gran parte de la costa mediterránea, especialmente el levante sur (València, Alicante, Murcia, Almería, etc.), presentaba un cierto grado de escasez de agua. Esto significa que se sustrae entre el 20-40 % del agua disponible anual (embalses, acuíferos, etc.), o más del 40 % si se trata de una situación de escasez extrema<sup>85</sup>. Si no se produce un cambio significativo en la situación se prevé que entre 2071 y 2100 el 71,3 % del territorio español ya esté en riesgo de desertización<sup>86</sup>, ya que se espera que la superficie de agua disponible disminuya, siendo en 2050 menos del 95 % de la superficie hábil existente en 2010<sup>87</sup>.

Además de estas circunstancias generales, un análisis desde 1976 a 2017 muestra que en España se producen sequías cíclicas, que se corresponde con varios años consecutivos con los valores de agua embalsada en la primera semana de junio por debajo del 60 %, que se repiten de manera cíclica (1979-1983, 1990-1995, 2005-2008)<sup>88</sup>. En 2022, en la primera semana de junio, el agua embalsada total en España era del 49 %, por debajo del valor del año anterior (59 %) y de la media de los último 5 y 10 años (62,6 % y 69,2 %, respectivamente)<sup>89</sup>.

En España, el mes de mayor estrés hídrico es julio<sup>90</sup>, coincidiendo con el periodo de mayor necesidad y demanda de agua de las cubiertas ajardinadas debido a las elevadas temperaturas, radiación solar y escasas precipitaciones. En meses o épocas de sequía o elevados grados de escasez de agua se trata de recortar el uso de agua en aquellos ámbitos en los que no afecte de manera directa al consumo humano, como por

83 Reyes-Paecke, S., Gironás, J., Melo, O., et al. 2019.

84 PwC. 2018.

85 International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). 2016.

86 PwC. 2018.

87 IIASA. 2016.

88 PwC. 2018.

89 Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2022c.

90 IIASA. 2016.





ejemplo en el riego de zonas verdes urbanas o jardines<sup>91</sup>. Por ello, se hace necesario establecer una serie de estrategias que permitan encontrar un equilibrio entre la escasez de agua y la renaturalización de las ciudades para mitigar los propios efectos del cambio climático<sup>92</sup>. Una posible estrategia es la combinación del uso de especies con menor demanda de agua con un estudio detallado del aporte de agua necesario. Investigaciones realizadas en diferentes jardines y espacios verdes, tanto públicos como privados, en dos ciudades españolas (Zaragoza y Barcelona) concluyeron que en más de la mitad de los casos se producía un riego excesivo, después de comparar el uso de agua real con la demanda estimada de la vegetación<sup>93</sup>. Este fenómeno se debe a la falta de adaptación a las necesidades reales de la vegetación y al uso de especies vegetales con mayor demanda de agua, como el césped o las especies ornamentales.

Otra estrategia se centra en la creación de ecosistemas más secos, con especies vegetales que dispongan de una necesidad hídrica menor<sup>94</sup>. En este sentido, se trata de eliminar o minimizar al máximo el riego aportado. En Portland (EE.UU.), que también presentan un problema grave de escasez de agua, el equilibrio entre la creación de espacios verdes en la ciudad y el control del agua de riego se aborda desde la administración de la ciudad. Para fomentar la construcción de cubiertas ajardinadas, pero con unas particularidades (especialmente del sustrato y la vegetación) que permitan reducir considerablemente el riego, se establecen bonificaciones que consisten en obtener permiso para aumentar la altura de cornisa en el centro de la ciudad de aquellos edificios nuevos que instalen una cubierta ajardinada sin riego o con valores por debajo del límite<sup>95</sup>.

De acuerdo con estas cuestiones, se plantean las maquetas sin ningún sistema de riego, también llamadas autosuficientes o *self-sustaining*<sup>96</sup>. Por lo tanto, es de gran importancia la elección de una vegetación autóctona, adaptada a los cálidos y secos veranos, con poca demanda de agua y que, en la bibliografía revisada, ha presentado un comportamiento adecuado bajo las condiciones extremas que supone la instalación en una cubierta ajardinada (elevada incidencia de la radiación solar, altas temperaturas, escasez de agua, fuertes vientos, etc.).

---

91 Reyes-Paecke, S., Gironás, J., Melo, O., *et al.* 2019.

92 *Ibidem.*

93 Domene, E., Saurí, D., Parés, M. 2005; Salvador, R., Bautista-Capetillo, C., Playán, E. 2011.

94 Reyes-Paecke, S., Gironás, J., Melo, O., *et al.* 2019.

95 Schroll, E., Lambrinos, J.G., Sandrock, D. 2011.

96 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.



### 6.3 MONTAJE DE LOS MODELOS

A continuación, se detalla la secuencia de capas y la construcción de cada uno de los modelos de maqueta, una vez especificadas sus propiedades y justificada su elección. En primer lugar, las tres maquetas se disponen sobre una base soporte elevada y resistente en el que depositar también la caja con los *data-loggers*. En València es habitual que se produzcan uno o dos eventos anuales de precipitaciones torrenciales (gota fría) que provocan problemas de inundaciones en diferentes puntos de la ciudad en general, y del campus de la UPV en particular. Con la intención de evitar que la acumulación puntual de agua pueda llegar a anegar las maquetas, produciéndose un indeseado problema de encharcamiento y posible pudrición de las raíces de la vegetación, y la caja de los *data-loggers*, dañando el sistema electrónico de estos, se disponen las maquetas a una altura aproximada entre 40 y 50 cm sobre el nivel del suelo.

Las tres maquetas se diseñan como cajones de madera de 1 m<sup>2</sup> de área interior y altura variable, contruidos con tablas de madera de pino de 1,8 cm de espesor. La altura interior de los cajones es de 20 cm en el caso del modelo A, 25 cm en el modelo B y 73 cm en el modelo C, en función del espesor de las diferentes capas de la sección constructiva de cada modelo. Estos cajones de madera, elevados sobre el nivel del suelo, se colocan a su vez sobre dos paneles de material aislante entre los cuales se ubica, protegido térmicamente, la sonda que medirá la temperatura bajo cada una de las maquetas (Figura 6.16). Los paneles aislantes se disponen ya con una pendiente aproximada del 5 % para permitir la evacuación del agua que no se pueda almacenar en la capa drenante y el sustrato, evitando que se produzcan acumulaciones de agua en capas no deseadas. Esta pendiente es la máxima permitida en cubiertas planas, y se dispone hacia uno de los laterales del cajón, en el cual se realiza una abertura lineal en la base para la evacuación del agua (Figura 6.17).

Los cajones de madera, tanto por el interior como por el exterior se protegen con una lámina de polietileno de baja densidad (LDPE) transparente. Se pretende proteger la madera de los rayos ultravioletas e infrarrojos que producen problemas de decoloración y desecación de la madera, al igual que de la humedad interior o las precipitaciones que producen problemas de pudrición.

Posteriormente, se procede a colocar, en el orden que se detalla para cada uno de los modelos (Tabla 6.15), las capas necesarias desde la lámina impermeable de EPDM hasta el material de acabado (Figuras 6.19, 6.20, 6.21, 6.22, 6.23). En el caso de la lámina impermeable y la lámina antiraíces, ambas ascienden por los laterales de los cajones. La lámina impermeable EPDM es resistente a los agentes atmosféricos, por lo que, no sufre ningún problema de deterioro al quedar vista en la parte superior de los laterales de los cajones. En el caso de las capas separadoras y la lámina filtrante, estas también ascenderán por los laterales, aunque no necesariamente toda la altura del cajón. En todas estas capas se deberán realizar aberturas puntuales para el paso de los tubos corrugados que servirán de conducto para la instalación de las sondas. Por último, respecto al material aislante, se coloca machiembrado ocupando toda la base de los modelos.

En el lateral opuesto a la pendiente se realiza una abertura lineal que permitirán introducir los tubos corrugados hasta el centro de la maqueta para instalar las sondas de forma cómoda y sencilla, conectando con la caja con los *data-loggers* que quedará al exterior del cajón (véase apartado 6.4.2) (Figura 6.18).



Figura 6.16. Cajones de madera con diferentes alturas para cada modelo y del nivel del suelo.



Figura 6.17. Abertura lineal en la base del cajón de madera del modelo A para evacuación de agua.



Figura 6.18. Abertura lineal en el lateral del cajón de madera del modelo A para instalación de sondas.



MODELO A	
Exterior	SONDA A5
	SONDA A4
	Grava, cantos rodados Ø 2-4 cm
	SONDA A3
	Capa separadora filtrante PP 100
	Aislante XPS, espesor 80 cm
	Capa separadora por incompatibilidad química + antiadherente PP 80
	SONDA A2
	Lámina impermeable EPDM, espesor 1 mm
Interior	SONDA A1 *

MODELO B	
Exterior	Vegetación, <i>sedum</i>
	SONDA B4
	Substrato, espesor 10 cm
	SONDA B3
	Lámina filtrante PP 100
	Capa drenante de paneles nodulares plásticos PE, espesor 4 cm
	Aislante XPS, espesor 50 cm
	Capa separadora por incompatibilidad química + antiadherente PP 80
	SONDA B2
	Lámina antiraíces PE 320
	Lámina impermeable EPDM, espesor 1 mm
Interior	SONDA B1

MODELO C	
Exterior	Vegetación, aromáticas
	SONDA C5
	SONDA C4
	Substrato, espesor 60 cm
	SONDA C3
	Lámina filtrante PP 100
	Capa drenante de paneles nodulares plásticos PE, espesor 4 cm
	Capa separadora retenedora de humedad P+PP 470
	Aislante XPS, espesor 40 cm
	Capa separadora por incompatibilidad química + antiadherente PP 80
	SONDA C2
	Lámina antiraíces PE 320
	Lámina impermeable EPDM, espesor 1 mm
	Interior

\* La ubicación de las sondas en cada una de las maquetas se detalla en el apartado 6.4.2.

Tabla 6.15. Orden y secuencia de ejecución de las capas de las maquetas de cubierta de los modelos A, B y C.



Figura 6.19. Colocación de la lámina impermeable EPDM, sistema no adherido, en el modelo A.

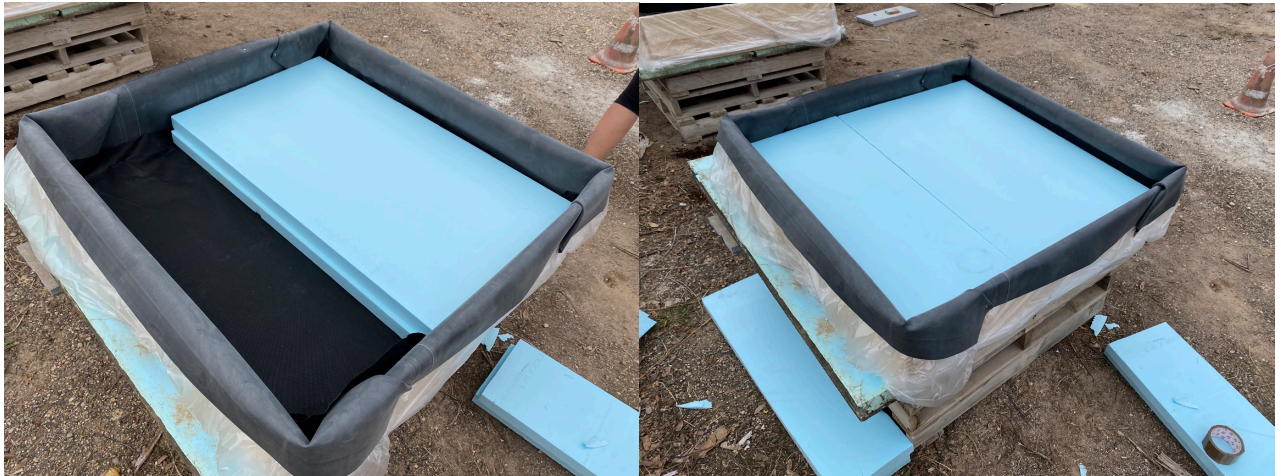


Figura 6.20. Colocación de los paneles machiembrados de XPS en el modelo A, sobre capa separadora por incompatibilidad química y antiadherente.



Figura 6.21. Colocación de capa drenante de paneles nodulares (izq.) y lámina filtrante (dcha.) en el modelo B.



Figura 6.22. Instalación del sustrato (izq.) y de la vegetación con especies sedum (dcha.) en el modelo B.



Figura 6.23. Modelos A, B y C terminados (de dcha. a izq.).



## 6.4 DATA-LOGGERS

### 6.4.1 Elección del sistema

Los *data-logger*, dispositivos empleados para registrar y almacenar datos sobre parámetros que resulten importantes para una investigación en concreto, se han encontrado en constante evolución desde los inicios en su uso hasta la actualidad. En gran parte se debe a su importancia estratégica como herramienta de mejora y conocimiento del funcionamiento de los sistemas constructivos y edificios, ya que controlar el comportamiento de construcciones en uso (más allá de su estudio teórico o en laboratorios) puede servir para conocer mejor la respuesta futura y reducir la incerteza sobre la evolución de los sistemas constructivos a lo largo de la vida útil de los edificios<sup>97</sup>. El almacenamiento de datos y su estudio, conociendo las condiciones de contorno concretas y el elemento constructivo a analizar, puede ser de gran utilidad para prever como va a ser su comportamiento, incluso para detectar, cuando el sistema presente irregularidades de comportamiento, problemas de patología o deterioro no visibles a simple vista<sup>98</sup>.

Además, estos sistemas de toma de datos no son destructivos, por lo que se pueden conocer diferentes parámetros físicos sin necesidad de dañar o alterar el edificio o sistema en cuestión. Esto hace que, en los últimos años, la investigación en edificios históricos se haya valido de esta técnica no destructiva, entre otras<sup>99</sup>.

En el caso de esta tesis, vamos a centrarnos en aquellos *data-loggers* capaces de proveer datos de temperatura y humedad relativa. De esa forma, un análisis en un instante determinado de la temperatura a lo largo de las diferentes capas de los modelos escogidos, al igual que de la humedad relativa, puede ayudar a comprender el comportamiento térmico y energético de cada modelo de cubierta. También permiten, a nivel de cada una de las capas de las maquetas, conocer su comportamiento y propiedades, ya que, especialmente en una cubierta ajardinada, el almacenamiento de agua es capaz de modificar el comportamiento térmico de algunas capas (como por ejemplo el sustrato o la capa drenante). En un estudio prolongado en el tiempo también se puede conocer el comportamiento del sistema constructivo de acuerdo con los cambios en el entorno y las condiciones climatológicas, determinando una trayectoria de la temperatura y la humedad relativa que nos puede ayudar a prever el comportamiento de otras cubiertas ajardinadas similares en circunstancias similares<sup>100</sup>.

También en el campo del estudio de edificios históricos, los *data-loggers* de temperatura y humedad relativa son los más empleados. El estudio higrotérmico de estas edificaciones es de gran importancia, ya que las condensaciones son responsables de lesiones importantes en los edificios históricos<sup>101</sup>, además de que el estudio de los gradientes de temperatura a través de los sistemas constructivos permite detectar daños no visibles a simple vista (en el interior de un muro de piedra de gran espesor), como por ejemplo fisuras o grietas<sup>102</sup>.

Algunos de los sensores más empleados, de acuerdo con García-Diego *et al.*<sup>103</sup> son aquellos individuales, independientes de la red eléctrica y con capacidad de almacenar los datos tomados en su memoria interna. Un ejemplo de este tipo de sensores son los DS1922L o DS1923, de la marca Maxim Integrated, los cuales toman datos independientes de temperatura y humedad relativa, respectivamente. El empleo de este tipo de sensores también se ha comprobado para un ambiente exterior, aunque cubierto (por lo tanto, protegido de la radiación solar y la incidencia de la lluvia<sup>104</sup>), en diferentes proyectos en la Casa de Ariadna, situada en

97 Guerra-Santin, O., Tweed, C.A. 2015.

98 Diego, F.-J.G., Esteban, B., Merello, P. 2015.

99 Diego, F.-J.G., Esteban, B., Merello, P. 2015; Gil, E., Lerma, C., Vercher, J., *et al.* 2017; Guerra-Santin, O., Tweed, C.A. 2015; Lerma, C., Borràs, J.G., Mas, Á., *et al.* 2021; Merello, P., Diego, F.-J.G., Zarzo, M. 2012; 2014.

100 Merello, P., Diego, F.-J.G., Zarzo, M. 2012.

101 Lerma, C., Borràs, J.G., Mas, Á., *et al.* 2021.

102 Gil, E., Lerma, C., Vercher, J., *et al.* 2017.

103 Diego, F.-J.G., Esteban, B., Merello, P. 2015.

104 AENOR. 2002; 2011.



Pompeya (Italia)<sup>105</sup>. En estas investigaciones también se pone a prueba la autonomía de los *data-loggers*, debido a la falta de tomas eléctricas y a la compleja accesibilidad del emplazamiento, hecho que dificulta el acceso para la descarga de datos. Se busca el equilibrio entre el consumo de batería del sensor, la capacidad de almacenamiento de datos de la memoria interna y la necesidad de registros de datos continuos para reflejar bien la trayectoria de temperatura y humedad relativa. Por ello, la toma de datos cada 30 minutos se mostró como suficiente, aportando un buen comportamiento del sensor y considerando los datos obtenidos como concluyentes<sup>106</sup>.

Algunos de los inconvenientes que han presentado este tipo de sensores han sido la autonomía de la batería y el almacenamiento de los datos, así como el coste elevado de gran parte de los *data-loggers* del mercado<sup>107</sup>. Respecto al primer problema, se puede solucionar con un equilibrio entre la frecuencia en la toma de datos y las visitas al emplazamiento para descargarlos, sin llegar a disminuir los registros a valores que no nos permitan conocer bien la trayectoria y comportamiento del sistema. En relación con el segundo de los problemas, se han desarrollado *data-loggers* de temperatura y humedad relativa de bajo coste, como por ejemplo los TH1165, de la marca Perfect Prime<sup>108</sup>.

En concreto, los sensores de estos *data-loggers* se han empleado, en combinación con otras técnicas no destructivas, en el estudio higrotérmico de la iglesia de Lliria (España). De acuerdo con las conclusiones obtenidas por Lerma *et al.*, los datos de estos sensores permitieron detectar las zonas con mayor riesgo de condensaciones en el interior del edificio histórico. Una de las conclusiones más relevantes de este estudio es la corroboración de los datos obtenidos con los sensores mediante IRT (del inglés *Infrared Thermography*) y simulaciones por elementos finitos (CFD, del inglés *Computational Fluid Dynamics*). Con unas diferencias entre sensores y CFD menores a 0,5 °C, y entre sensores e IRT no superiores a 0,3 °C se corroboró la concordancia de los datos, sirviendo, por lo tanto, como validación<sup>109</sup>.

El uso de los *data-loggers* en esta investigación previa en Lliria nos ha permitido y facilitado su elección y uso para la toma de datos en los modelos de las cubiertas ajardinadas construidos y en investigación.

Los *data-loggers* TH1165 de temperatura y humedad relativa se van a emplear, en combinación con sondas, en un ambiente exterior, pero protegido. Para ello se aprovecha la posibilidad de estos dispositivos de incorporar una sonda exterior<sup>110</sup> (Figura 6.24). Se dispone la sonda dentro de las maquetas, entre las diferentes capas, tomándose datos de temperatura y humedad relativa en el centro de la maqueta. De esta forma, todos los *data-loggers* de una misma maqueta se agrupan en una caja en el exterior (Figura 6.25), protegiéndolos de la radiación solar y las precipitaciones<sup>111</sup>, al igual que se facilita el acceso a ellos para la toma de datos.

Los *data-loggers* funcionan de manera autónoma (Batería: 3V, AAA x 2) y en cada registro de la sonda se incluyen los valores de temperatura, temperatura de rocío, humedad relativa, fecha, hora y número/nombre del *data-logger* y la sonda. En la tabla 6.16 se indican las principales características del *data-logger* TH1165, cumpliendo con los requisitos de las normas UNE-EN 15758<sup>112</sup> y UNE-EN ISO 7726<sup>113</sup>, que limitan la incertidumbre del termómetro para la temperatura del aire en, como máximo, 0,5 °C, siendo los valores deseables en torno a 0,2-0,25 °C.

105 Merello, P., Diego, F.-J.G., Zarzo, M. 2012; 2014.

106 Merello, P., Diego, F.-J.G., Zarzo, M. 2012.

107 Guerra-Santin, O., Tweed, C.A. 2015.

108 Perfect Prime. 2022a; 2022b.

109 Lerma, C., Borràs, J.G., Mas, Á., *et al.* 2021.

110 Perfect Prime. 2022a.

111 AENOR. 2002; 2011.

112 AENOR. 2011.

113 AENOR. 2002.





Figura 6.24. Data-logger TH1165 (izq.) y sonda exterior (dcha.).



Figura 6.25. Agrupación de data-loggers en caja lateral, facilitando la toma de datos.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Rango de medición de temperaturas	-40 °C a 125 °C*
Rango de medición de humedad relativa	0 a 100 % RH
Máxima capacidad de almacenamiento de datos	21 000 registros
Incertidumbre en mediciones de temperatura	± 0,3 °C @25 °C
Incertidumbre en mediciones de humedad relativa	± 2 % RH @25 °C

\* Cuando se emplea sonda exterior.

Tabla 6.16. Principales características del data-logger TH1165.

### 6.4.2 Ubicación e instalación

En el caso de estudio de esta tesis, se van a instalar las sondas agrupándolas por modelo. Para facilitar el nombramiento de los *data-loggers* y las sondas, y la posterior agrupación de datos cabe recordar que el modelo A es con acabado de grava, el modelo B con ajardinamiento extensivo y substrato de 10 cm de espesor, y el modelo C con ajardinamiento intensivo y substrato de 60 cm de espesor.



Se emplean 13 *data-loggers*, con su respectiva sonda exterior. En el modelo A se instalan 4 sondas (A1-A2-A3-A4), en el modelo B se instalan otras 4 (B1-B2-B3-B4) y en el modelo C se instalan las últimas 5 (C1-C2-C3-C4-C5). En las figuras 6.27, 6.28 y 6.29 se especifica la ubicación de cada una de las sondas (de igual nombre que los *data-loggers*) entre diferentes capas del sistema constructivo de cada modelo.

Todas las sondas se disponen en el centro del cajón, a 50 cm de todos los lados, para minimizar las condiciones de contorno de la maqueta de investigación. Para facilitar la extracción o sustitución de las sondas en el caso de que ocurra algún problema, se disponen conductos de tubo corrugado de diámetro 25 mm y longitud suficiente para que uno de los extremos quede situado en el centro del modelo (Figura 6.26).



Figura 6.26. Conducto de tubo corrugado para sonda exterior del *data-logger* B3, sobre lámina filtrante.

En el caso de las sondas situadas bajo la caja que conforma cada uno de los modelos, estas se protegen mediante planchas de aislamiento térmico, realizadas con XPS de 5 cm de espesor. Se aprovecha el machiembreado como cauce para apoyar el conducto. Así se consigue que la temperatura bajo cada uno de los modelos de cubierta esté más aislada de la temperatura ambiente.

Por último, respecto al ajuste de los parámetros de los diferentes *data-loggers* y sus sondas, a pesar de que se puede realizar mediante modos ya integrados en el dispositivo, se opta por una sincronización desde el ordenador. Este sistema nos permite controlar de forma más visual los parámetros escogidos, como por ejemplo el número/nombre de cada dispositivo y su sonda, la frecuencia de registros (30 minutos) y la cantidad máxima de datos a almacenar (su máxima capacidad: < 21 000 registros)<sup>114</sup>. La sincronización se realiza mediante un programa de ordenador desarrollado expresamente por la propia empresa para los *data-loggers* TH1165. Este permite descargar los datos almacenados en el *data-logger*, sincronizar e iniciar una nueva toma de datos, al igual que incluye la conversión de los datos en un archivo Excel. Para poder controlar la evolución de los modelos y el estado de las sondas, el vuelco de datos al ordenador se realiza cada 7-14 días.

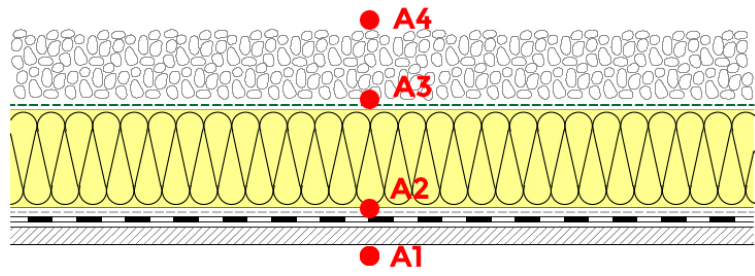


Figura 6.27. Ubicación y nomenclatura de las sondas del modelo A.

114 Perfect Prime. 2022a.

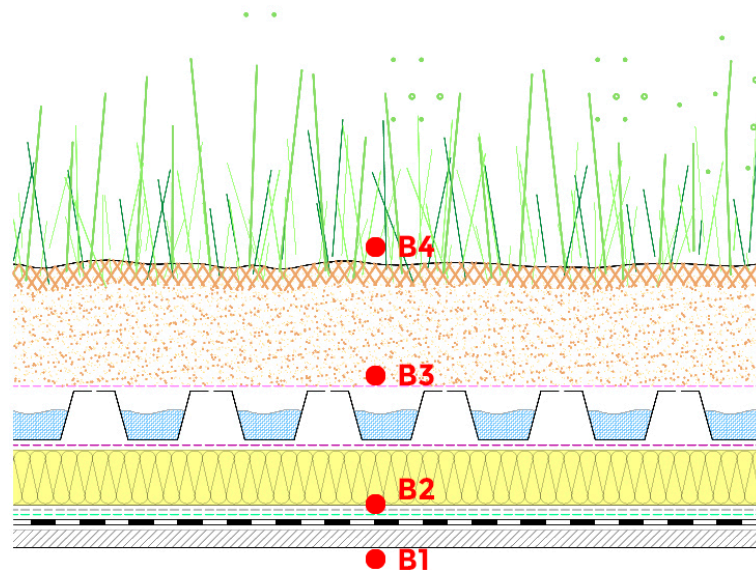


Figura 6.28. Ubicación y nomenclatura de las sondas del modelo B.

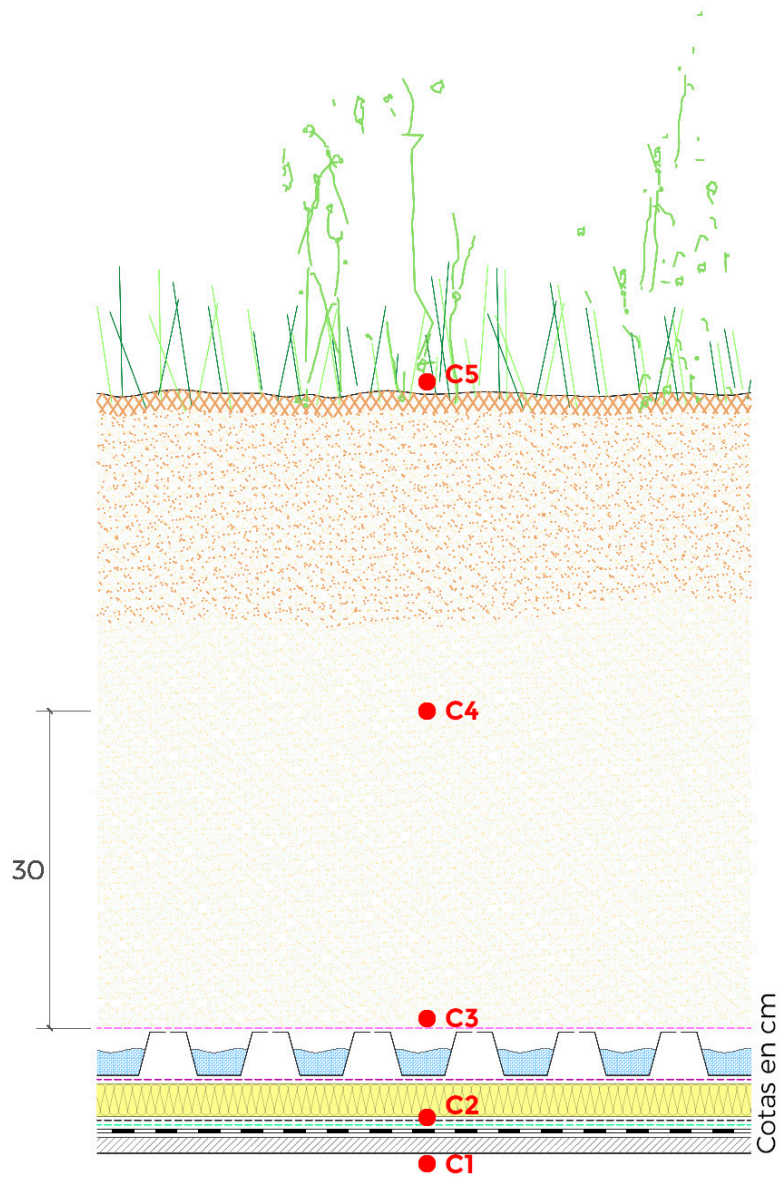


Figura 6.29. Ubicación y nomenclatura de las sondas del modelo C.



## 6.5 CONTROL DE LA VEGETACIÓN

### 6.5.1 Control fotográfico

Se llevó a cabo un control fotográfico de la vegetación desde el momento de la implantación (marzo 2021) hasta la finalización de la toma de datos con las sondas instaladas en las maquetas. A continuación, se van a aportar diferentes imágenes (Figura 6.30), cronológicamente ordenadas, para ver la evolución de la vegetación. El estado de la vegetación, su poder de cubrición, la repercusión del estrés hídrico y las épocas con escasez de lluvias, así como el rápido desarrollo tras un largo periodo de precipitaciones, se pueden observar en las imágenes y justifican los datos obtenidos por los *data-loggers* y las sondas.





Figura 6.30. Control del estado de la vegetación en los modelos B (izq.) y C (dcha.).



Las fechas de toma de cada par de imágenes incluidas en la figura 6.30 se asocian con nueve números de la siguiente forma:

- 1: 25/03/2021.
- 2: 10/06/2021.
- 3: 22/07/2021.
- 4: 08/10/2021.
- 5: 10/12/2021.
- 6: 28/01/2022.
- 7: 09/03/2022.
- 8: 06/04/2022.
- 9: 06/05/2022.

### 6.5.2 Consideraciones sobre el estado de la vegetación

Tal y como se aprecia en las imágenes tomadas en el primer mes tras la implantación (marzo) y en el primer mes de toma de datos (junio), en los tres meses transcurridos se produjo un crecimiento de la vegetación. En el caso de las especies tipo *sedum* del modelo B el crecimiento implicó una mayor cobertura de la superficie de la maqueta, especialmente creció más el *sedum spurium* (incluida la variedad *coccineum*). Esta especie almacena poca agua en sus hojas, a pesar de ser una planta tipo suculenta. Además, se evidenció en el mes de junio una coloración de la vegetación más verdosa que rojiza, ya que estas especies, especialmente la variedad de *sedum spurium var. coccineum*, adquieren una tonalidad rojiza cuando hay escasez de agua. Por lo tanto, el mayor crecimiento y la coloración de esta vegetación confirman que entre marzo y junio de 2021 (primavera) aconteció un periodo de lluvias que fomentó el desarrollo de la vegetación, al igual que ha ocurrido en el mismo periodo del año siguiente (2022). En el caso del modelo C se observó el crecimiento de la vegetación, especialmente de la *santolina chamaecyparissus*, seguida del *thymus vulgaris*. Las tres especies instaladas en esta maqueta florecieron.

Las imágenes tomadas un mes después (julio) ejemplifican la falta de agua, junto a las altas temperaturas y elevada radiación solar producida en verano. La vegetación del modelo B presentaba una coloración rojiza o más apagada, pero sin mortalidad en ninguna de las especies. En el caso del modelo C, se paralizó el crecimiento y se perdió coloración en la *santolina chamaecyparissus* y el *thymus vulgaris*. Además hubo una mortalidad del 100 % en la especie *armenia marítima*. La capacidad de supervivencia de las especies *sedum*, gracias a su almacenamiento de agua y menor consumo en épocas de estrés hídrico se pudo observar a partir del mes de octubre. De las 17 plantas instaladas, en octubre ya se habían secado 6 de ellas, siendo todas *sedum spurium* (2 de *sedum spurium var. coccineum* y 4 de *sedum spurium*). En el modelo C habían muerto ya todas las plantas de *armenia marítima* y la mitad de los *thymus vulgaris* (2). Todas las plantas de la especie *santolina chamaecyparissus* (modelo C) y *sedum album* (modelo B) presentaron una supervivencia del 100 % hasta el mes de octubre de 2021, pero paralizaron su crecimiento. A partir de diciembre se vio una continuación de esta situación, más acentuada debido a que, a pesar de las temperaturas más bajas de los meses de invierno, las precipitaciones fueron pocas y la radiación solar era elevada. Además, con el paso de los meses se observó una coloración más rojiza en la vegetación tipo *sedum* que habían sobrevivido.

A principios del mes de marzo de 2022, cuando se inició el periodo anual con más precipitaciones, la vegetación se encontraba en el momento más crítico debido a la falta de agua. En el modelo B tan solo se mantenía viva la especie *sedum album* (con una supervivencia del 100 %, las 6 plantas). Cabe destacar que apareció una nueva especie que se fue desarrollando desde los primeros días de instalación. Inicialmente tan solo se encontraba una pequeña rama de esta especie, pero, a pesar de las condiciones adversas, se desarrolló, incluso llegando a invadir completamente el espacio previamente ocupado por dos plantas de la variedad *sedum spurium*. Se trata de una especie de *sedum* que también almacena agua en su estructura de hojas: *sedum sediforme* (figura 6.31). En el modelo C se produjo una supervivencia del 75 % de las *santolina chamaecyparissus* (3), mientras que de las 2 plantas de *thymus vulgaris* supervivientes quedaban en ese momento tan solo la mitad de dos de ellas con hojas.

En abril y mayo, en pleno periodo de lluvias y tras el mes de marzo (el más lluvioso de todo el periodo estudiado) se observó un mayor desarrollo y crecimiento de la vegetación del modelo B. Todas las plantas de la variedad de *sedum album* adquirieron de nuevo una tonalidad verde más intensa, así como aumentaron su crecimiento y cubrición de la superficie. En las imágenes tomadas en el mes de mayo se podía observar también el rápido crecimiento de la especie *sedum sediforme* (figura 6.31) y que gran parte de las especies



*sedum spurium* y *sedum spurium* var. *coccineum* (8 plantas de las 11 instaladas inicialmente) mejoraron considerablemente su estado.



Figura 6.31. *Sedum Sediforme*: estado a 06/04/2022 (izq.) y 06/05/2022 (dcha.).

Estos datos coinciden con la investigación llevada a cabo por Zheng *et al.*<sup>115</sup> en una cubierta autosuficiente extensiva (con espesor de sustrato de 5 m) con *sedum lineare*, en un clima con veranos secos y cálidos (al igual que el clima mediterráneo). La vegetación aumentó claramente su mortalidad durante el verano, pero al año siguiente revivió sin necesidad de aportar riego artificial, al igual que ha ocurrido en la maqueta del modelo B, estudiado en València, con las variedades *sedum spurium* y *sedum spurium* var. *coccineum*. En otra investigación llevada a cabo en Melbourne (Australia) en una cubierta ajardinada sin riego, tras el verano Rayner *et al.*<sup>116</sup> reportaron un 100 % de supervivencia de las especies de *sedum pachyphyllum* y *rubrotinctum*. Se trata de dos especies con las hojas más suculentas, es decir, con mayor cantidad de agua disponible en el interior de la planta para sus procesos metabólicos una vez el sustrato se queda sin humedad. Estas son muy similares al *sedum album* empleado en esta investigación, el cual también ha presentado una supervivencia del 100 %. También comprobaron que, a pesar de la supervivencia, el vigor y la salud de todas las especies disminuyó a partir de la época de sequía y calor<sup>117</sup>, tal y como se ha podido comprobar en la maqueta del modelo B (en este caso más condicionado por la falta de precipitaciones que por la temperatura ambiente). A conclusiones similares llegaron Nektarios *et al.*<sup>118</sup>, comprobando que de 16 y 28 especies de *sedum* estudiadas tan solo *sedum album*, *acre*, *reflexum* y *sexangulare* se establecieron correctamente. La experiencia con la vegetación del modelo B confirma estas conclusiones, ya que el mejor comportamiento y desarrollo ha sido por parte del *sedum album* y el *sedum sediforme* (muy similar al *sedum reflexum*).

En cambio, en el caso de la vegetación del modelo C se pudo apreciar en el mes de mayo un considerable crecimiento de las 5 plantas supervivientes: 3 de la variedad *santolina chamaecyparissus* y 2 de la variedad *thymus vulgaris*. Incluso los *thymus vulgaris* florecieron, pero cabe destacar que tan solo floreció y creció la parte del arbusto que había sobrevivido. Es decir, en los arbustos instalados en el modelo C no se produjo una refluoración después de que su estado se deteriorara debido a la escasez de agua.

Una experiencia similar reportaron Du *et al.*<sup>119</sup> con la instalación de arbustos en cubiertas ajardinadas. Este tipo de vegetación mejoró la evapotranspiración después de las lluvias respecto a las especies suculentas, pero eran más vulnerables al estrés hídrico. La mortalidad de los arbustos instalados en una cubierta extensiva (con espesor de sustrato de 13 cm) aumentó considerablemente al final del verano, después de un mes con solo 1,2 mm de lluvia. Además, tan solo 2 de 15 especies instaladas reflorecieron o revivieron después de este periodo seco y cálido, al igual que ocurrió con las especies vegetales arbustivas instaladas en la maqueta del modelo C. Por lo tanto, el hecho de que sean especies de arbustos propios de climas áridos, secos y cálidos no parece ser determinante para que sobrevivan en cubiertas ajardinadas autosuficientes<sup>120</sup>.

115 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.

116 Rayner, J.P., Farrell, C., Raynor, K.J., *et al.* 2016.

117 *Ibidem*.

118 Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N. 2021.

119 Du, P., Arndt, S.K., Farrell, C. 2019.

120 *Ibidem*.



## 6.6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.6.1 Datos meteorológicos

La instalación de las maquetas y la toma de datos de las 13 sondas se prolongó a lo largo de 12 meses, iniciándose el 1 de junio de 2021 y finalizando el 31 de mayo de 2022. A lo largo de este periodo se obtuvieron también datos meteorológicos de la ciudad de València, concretamente de la estación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en el Campus de Vera de la UPV para los datos de temperatura (Figura 6.32), humedad relativa (Figura 6.33) y precipitaciones (Figura 6.34), y la estación del Aeropuerto (Manises) para los datos de radiación solar (Figura 6.35), todo ello gestionado a través de la Unidad de Medio Ambiente de la UPV. La estación del Campus de Vera estuvo fuera de funcionamiento durante dos periodos de tiempo a lo largo de este año, del 8 al 15 de octubre de 2021 y del 14 al 30 de marzo de 2022. En estas fechas, por lo tanto, tan solo se dispone de datos de radiación solar.

Respecto a los datos de radiación solar, se toman los valores de radiación solar global, es decir la energía solar total que llega sobre la superficie terrestre<sup>121</sup>, compuesta por la suma de la radiación solar directa, reflejada y difusa.

Es importante comprobar si el año en el que se ha llevado a cabo el estudio de las maquetas (junio 2021 a mayo 2022) sigue el patrón de los años anteriores y, por lo tanto, los datos y conclusiones extraídas sobre el comportamiento de las cubiertas ajardinadas en los siguientes apartados pueden considerarse extrapolables a otros años. Para ello se ha estudiado temperatura ambiental desde 2001 hasta la fecha de finalización del estudio, en 2022, comprobando si la media de temperatura de los doce meses de estudio se ajusta a los valores medios de los últimos 22 años.

Si se aplica el teorema de Chebychev ( $\mu \pm k \cdot \sigma$ ), y considerando la distribución de datos como una distribución no normal (forma de campana), todos los valores medios de temperatura mensual del año de estudio de las maquetas quedan dentro del rango determinado por  $\mu \pm 1,5\sigma$ , siendo  $\mu$  la temperatura media mensual en el periodo 2001-2022 y  $\sigma$  la desviación estándar. De acuerdo con el teorema de Chebychev, en este caso, multiplicando la desviación estándar por 1,5 (el mínimo valor de  $k$  para una distribución de datos no normal), al menos 55,6 % de los datos deberían encontrarse dentro de este rango. En este caso todas las temperaturas medias mensuales de los meses de estudio de las maquetas se encuentran dentro del rango para los datos de cada uno de los meses.

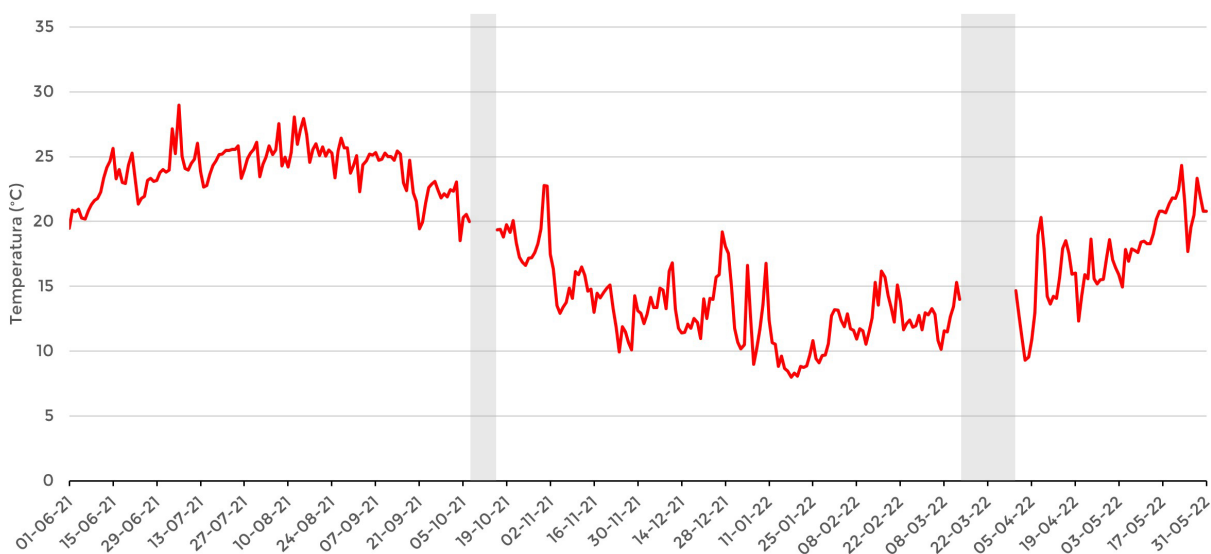


Figura 6.32. Temperatura media diaria (°C) en la estación del Campus de Vera de la UPV (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.

121 Ramírez, J.D.M. 2019.



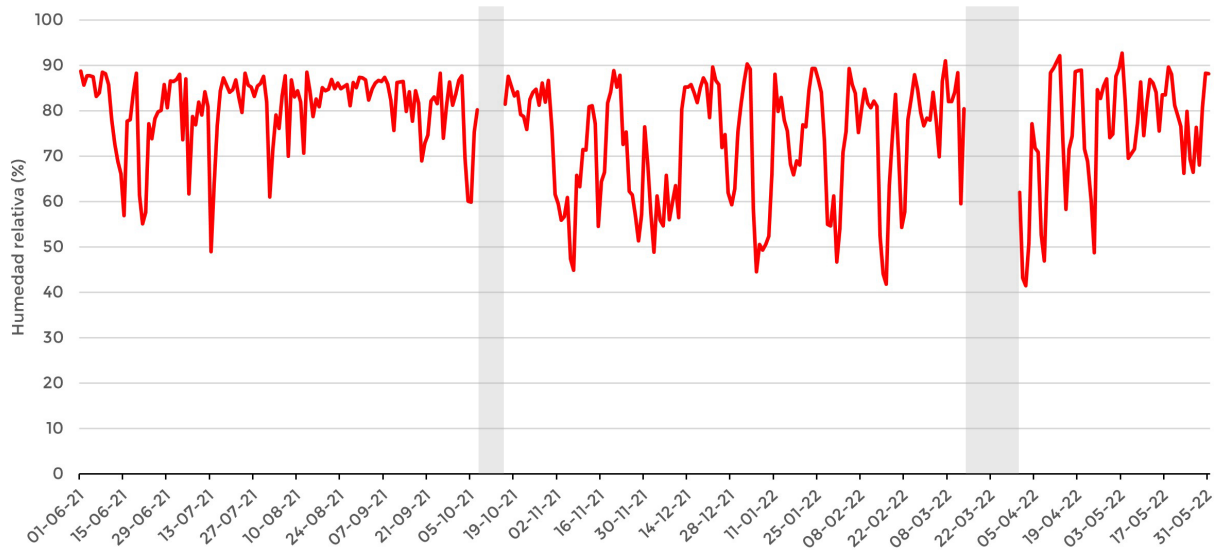


Figura 6.33. Humedad relativa media diaria (%) en la estación del Campus de Vera de la UPV (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.

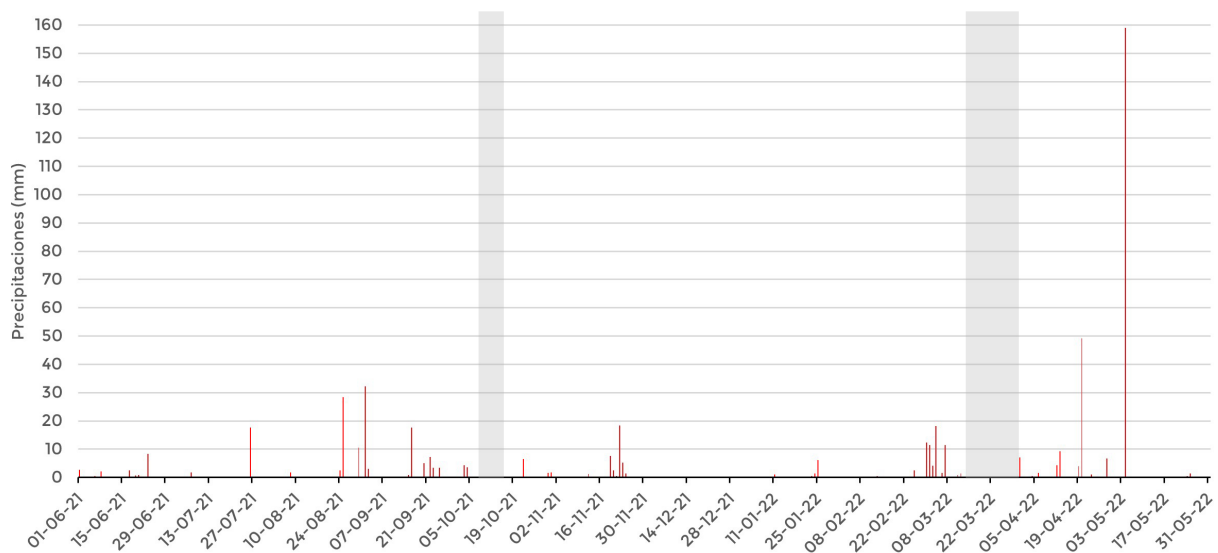


Figura 6.34. Precipitaciones totales diarias (mm) en la estación del Campus de Vera de la UPV (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.

En el caso de la humedad relativa se estudia el periodo desde 2010 hasta 2022. En este caso todas las medias mensuales de humedad relativa de los meses de estudio de las maquetas se encuentran dentro del rango determinado por  $\mu \pm 2\sigma$  ( $k=2$ ). Para este caso, el teorema de Chebychev indica que dentro de este rango se encontrarán como mínimo el 75 % de los datos. Respecto a las precipitaciones, se analiza el total de precipitaciones anual desde 2011 hasta 2021. En el caso del año de estudio de las maquetas, el valor de precipitación anua total se sitúa dentro del rango establecido por  $\mu \pm 2\sigma$ . La información y tablas más detalladas sobre el proceso se encuentran en el Anexo II.

De acuerdo con esta información, se puede concluir que el año de estudio de las maquetas ha sido un año típico. Se encuentra dentro de los valores normales de temperatura, humedad relativa y precipitaciones de los últimos años.

Tal y como se podía observar en la figura 2.1 (véase apartado 2.1) las temperaturas máximas, mínimas y medias han ido ascendiendo en las últimas décadas. Este aumento se produce poco a poco, por lo que, al estudiar el periodo 2001-2022, las temperaturas registradas en el año de estudio de las maquetas se consideran típicas y comparables con las de años anteriores. Aun así, no se debe perder de vista la problemática



del cambio climático y su evolución. Un cambio en los perfiles de temperatura o precipitaciones, derivado del deterioro del medioambiente, puede suponer una modificación respecto al comportamiento de las cubiertas ajardinadas. Es por ello que los datos y conclusiones que se presentan más adelante respecto a estas cubiertas con acabado vegetal se consideran extrapolables a otros años, pero se deberá considerar una revisión periódica de su comportamiento para ajustarse a los cambios en el entorno y las condiciones climatológicas.

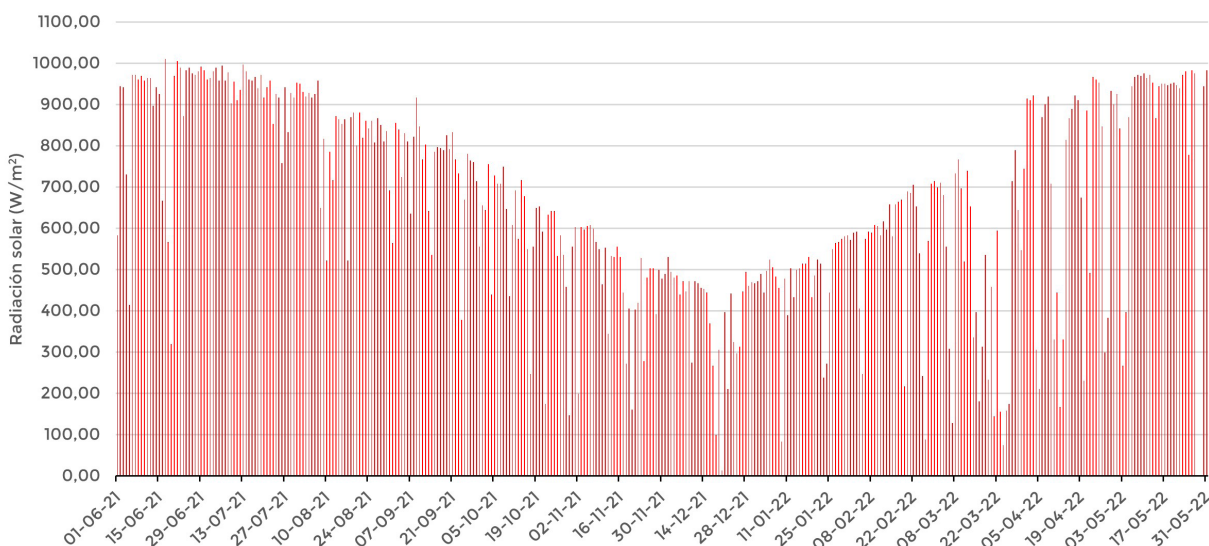


Figura 6.35. Radiación solar global máxima diaria ( $W/m^2$ ) en la estación del Aeropuerto (Valencia, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.

### 6.6.2 Datos de temperatura y humedad relativa por maquetas

Una visión general de todos los datos de temperatura recogidos por sonda y maqueta permite identificar rasgos del comportamiento térmico de cada uno de los modelos de cubierta estudiados (figura 6.36). Las sondas colocadas en la superficie de las cubiertas presentan la mayor amplitud de datos (aun exceptuando los valores atípicos). En especial, las sondas C5 y B4 presentan límites de caja más extremos, muy cercanos o por encima de los  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$  y por debajo de los  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Los valores máximos de las sondas C5 y B4 son superiores a la sonda A4 (cuyo límite superior se sitúa en torno a los  $43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) debido a factores de reflexión. En València, de acuerdo con la figura 6.35, se producen elevados valores de radiación solar a lo largo de todo el año. En el caso de los modelos ajardinados B y C el substrato presenta un color oscuro, con menor albedo, es decir, menor reflexión y mayor absorción de la radiación. Esto produce un calentamiento de la superficie del substrato, alcanzando temperaturas mayores que la superficie de gravas del modelo A, de color blanco y que presentan un mayor albedo y menor absorción de la radiación.

La vegetación también juega un papel importante. El albedo de la vegetación, normalmente situado en valores de entre 0,2 y 0,3, en función de la densidad foliar de la propia capa (es decir, el LAI) permite que se produzca una reflexión de parte de la radiación solar, antes de llegar a la capa de substrato, y la absorción de otro porcentaje para llevar a cabo procesos metabólicos como la fotosíntesis. En este caso, la vegetación del modelo B (extensiva, *sedum* y tapizante) presenta, durante parte del año de investigación, poca cobertura del substrato y menor LAI que la vegetación del modelo C (véase apartado 6.5), lo que implica menor densidad de sombra y mayor incidencia directa de la radiación. Podemos observar que los valores límite de la caja de la sonda B4 se sitúan en temperaturas mayores que la sonda C5 (intensiva, vegetación de mayor altura y mayor LAI). En el caso del modelo C, la vegetación protege el substrato y evita una mayor incidencia de la radiación solar, pero su escaso desarrollo y supervivencia, especialmente desde julio de 2021 hasta marzo de 2022 (época con menor temperatura ambiente), implica una menor protección del substrato, por



lo que el límite inferior de la caja de la sonda C5 se sitúa en temperaturas más bajas que el límite inferior de la sonda B4, pero muy similares y por encima de la sonda A4.

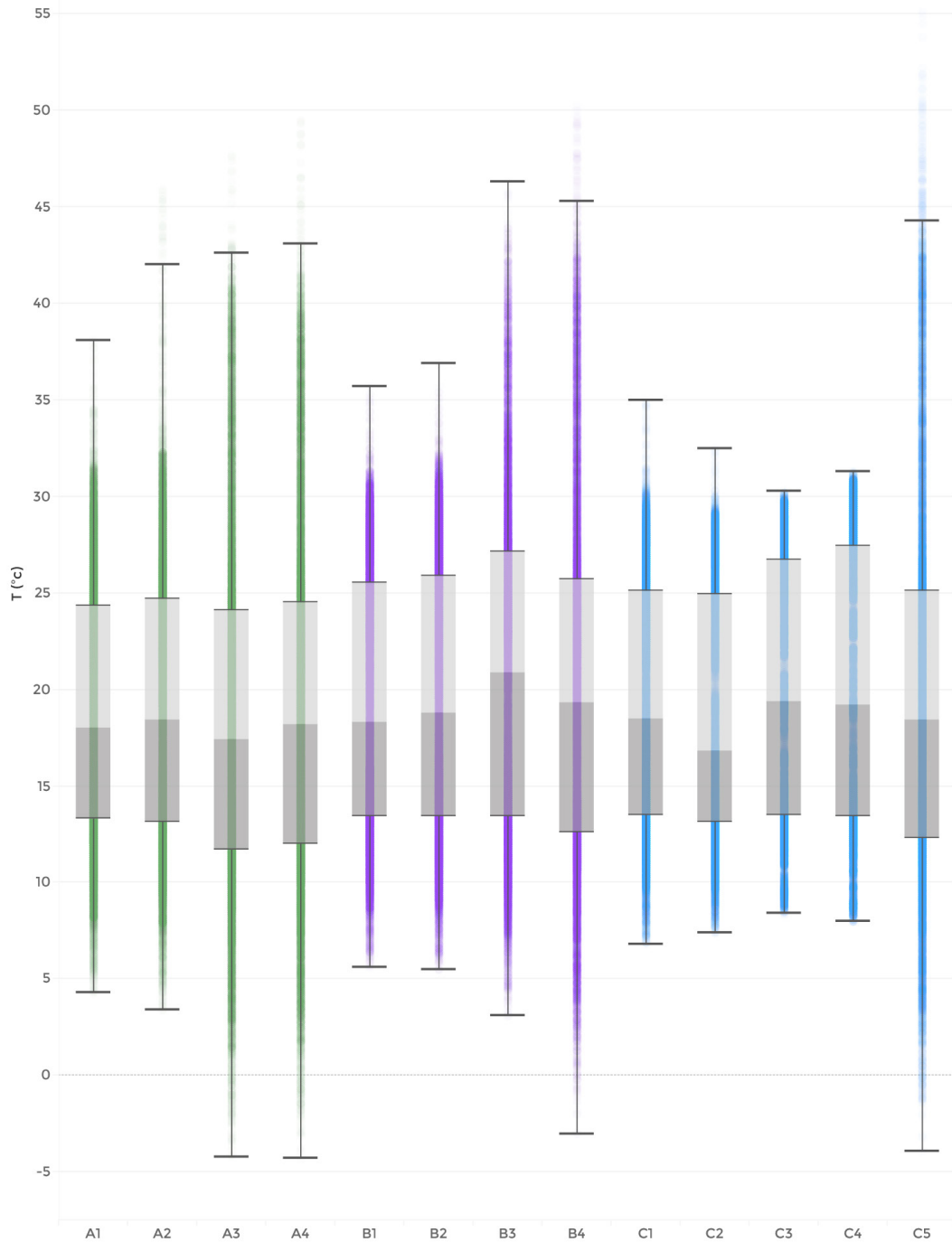


Figura 6.36. Diagrama de cajas con la distribución de los datos de temperatura (°C) por sonda y por maqueta del 01/06/2021 al 31/05/2022.

En el caso de los modelos B y C, al tratarse de cubiertas ajardinadas autosuficientes, es decir, sin sistema de riego, las temperaturas superficiales son muy similares a las del modelo con protección de grava (A). Al disponer de una cantidad de agua limitada, las pérdidas de calor por evapotranspiración (principal mecanismo de disipación de calor en las cubiertas ajardinadas) se ven condicionadas al agua disponible almacenada en las capas de la cubierta, la cual también se emplea por la vegetación para sobrevivir. Estos datos coinciden con Zheng *et al.*<sup>122</sup>, que determinaron que cuando la humedad del sustrato es alta la diferencia entre la temperatura superficial del sustrato en una cubierta ajardinada y la temperatura superficial de una cubierta tradicional es mayor, mientras que cuando la humedad del sustrato es menor al 5 % la diferencia

122 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.



entre estas temperaturas es mucho menor, incluso nula. En el caso de que la humedad almacenada en el sustrato sea inferior al 5 %, el papel principal en el control de la temperatura superficial de la cubierta y los flujos de calor a través de ella recae en la sombra de la vegetación. En sus investigaciones detectaron, a pesar de que el sustrato presentaba valores de humedad por debajo del 5 %, diferencias entre las temperaturas máximas superficiales de la cubierta ajardinada y tradicional de unos 10 °C<sup>123</sup>. Cabe destacar que, en el caso de las maquetas estudiadas, esta diferencia es menor, siendo más baja la temperatura máxima de la superficie de la cubierta tradicional con acabado de grava. Esto se debe al diferente albedo entre ambas superficies y al porcentaje de mortalidad de la vegetación instalada en estos modelos de cubierta autosuficiente. Si presentaran albedos similares, la diferencia entre las temperaturas superficiales de ambos tipos de cubierta podría alcanzar valores superiores. Zheng *et al.*<sup>124</sup> determinaron que con un sustrato seco y una elevada mortalidad de la vegetación la reducción de los flujos de calor se debía principalmente al espesor del sustrato y a la conductividad en estado seco, ya que no había elementos de protección y sombra que impidieran alcanzar elevadas temperaturas superficiales sobre el sustrato.

En la figura 6.37 se representan los datos de humedad relativa recogidos por sonda y maqueta. Se observa que la humedad en la capa superficial de los tres modelos de cubierta ajardinada es muy similar (A4, B4 y C5). Esto indica que el fenómeno de evaporación del agua del sustrato (parte fundamental del proceso de evapotranspiración) no está desarrollándose en toda su magnitud. En el caso del modelo de cubierta C, al disponer de un mayor espesor de sustrato (60 cm) y una lámina absorbente de agua que aumenta la capacidad de almacenamiento de humedad, consigue mayores valores de evaporación en el sustrato, disipando así el calor almacenado en él. El 75 % de los datos obtenidos se sitúan entre una humedad relativa del 100 % y del 63 %, aproximadamente. En cambio, en el modelo B el 75 % de los datos se sitúa en valores en torno al 100 % y el 57 %. Es decir, la menor capacidad de almacenamiento de agua del modelo B (debido al poco espesor de sustrato, 10 cm) ha determinado que se produzcan menores pérdidas de calor por evaporación del sustrato, reflejado en menores valores de humedad relativa en la superficie del sustrato (deseccación).

Aun así, los valores de humedad relativa de las sondas C5 y B4 son muy similares, a pesar de que la maqueta C es capaz de almacenar mayor cantidad de agua. En las sondas C2, C3 y C4, el 75 % de los datos de las tres sondas se sitúan por encima de una humedad relativa del 80 %. En el caso de la sonda C4, situado en medio del sustrato a una profundidad de 30 cm, la mediana de los datos se ubica casi en el 100 %, estando todos los datos (a excepción de valores atípicos) por encima del 85 %. Por otro lado, la sonda B3, bajo el sustrato de 10 cm de espesor presenta también valores elevados de humedad, estableciendo el límite inferior de la caja por encima de una humedad del 65 %. Aun así, la capacidad de almacenamiento de agua de este modelo de cubierta ajardinada extensiva es muy limitada, ya que la humedad detectada en la sonda B2 ya es mucho menor en comparación con los valores de las sondas C2 y C3. Este mayor almacenamiento de agua en el modelo C, pero, no se traduce en una evaporación del sustrato significativamente mayor, como se ha indicado. Esto se puede deber al tipo de vegetación. Las especies *sedum* (modelo B) son capaces de almacenar agua en sus hojas, soportando mejor las épocas de estrés hídrico, por lo que hacen un uso más racionado del agua disponible en el sustrato. Las especies de plantas no suculenta, como los arbustos instalados en el modelo C, a pesar de estar adaptadas al clima mediterráneo (cálido y seco), emplean mayor cantidad de agua, consumiendo gran parte del agua almacenada en el sustrato y capas inferiores del modelo C para su supervivencia.

Además de los datos referentes a las capas superficiales, la temperatura en las diferentes capas de las maquetas también nos aporta cierta información relevante. En el caso del modelo C, podemos apreciar la elevada inercia térmica del sustrato, ya que las sondas C2, C3 y C4 presentan unos límites de cajas muy similares. En este caso, la mínima capa de material aislante dispuesta entre las sondas C2 y C3 no aporta una caída sustancial de las temperaturas, ya que esta capa se diseña con la única intención de minimizar la variación de conductividad térmica del sustrato debido a la acumulación de humedad. Podemos observar que en el caso de la sonda C2 los límites son ligeramente más extremos que en la sonda C3 a pesar de situarse bajo 4 cm de material aislante. Esto se debe a que, a pesar de proteger con material aislante la parte inferior de las maquetas, se han podido producir puentes térmicos que aumentan la amplitud térmica tanto

123 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.

124 *Ibidem.*



de esta sonda como de la C1 (más expuesta al situarse entre el material aislante pero fuera de la caja de maqueta). Esto mismo ocurre con el resto de las maquetas (sondas A1 y B1). En estos dos modelos, bien por no disponer de substrato (modelo A) o por disponer de una capa de poco espesor (modelo B), la principal reducción en la amplitud térmica se produce entre las sondas B3 y A3 (sobre el aislante) y las B2 y A2 (bajo el aislante). La mayor amplitud térmica en la superficie de los modelos B y C (ajardinados) no se traduce en mayor variación térmica en las capas inferiores gracias a la inercia térmica del substrato, consiguiendo bajo la cubierta (sondas B1 y C1) temperaturas menos extremas que en la sonda A1.

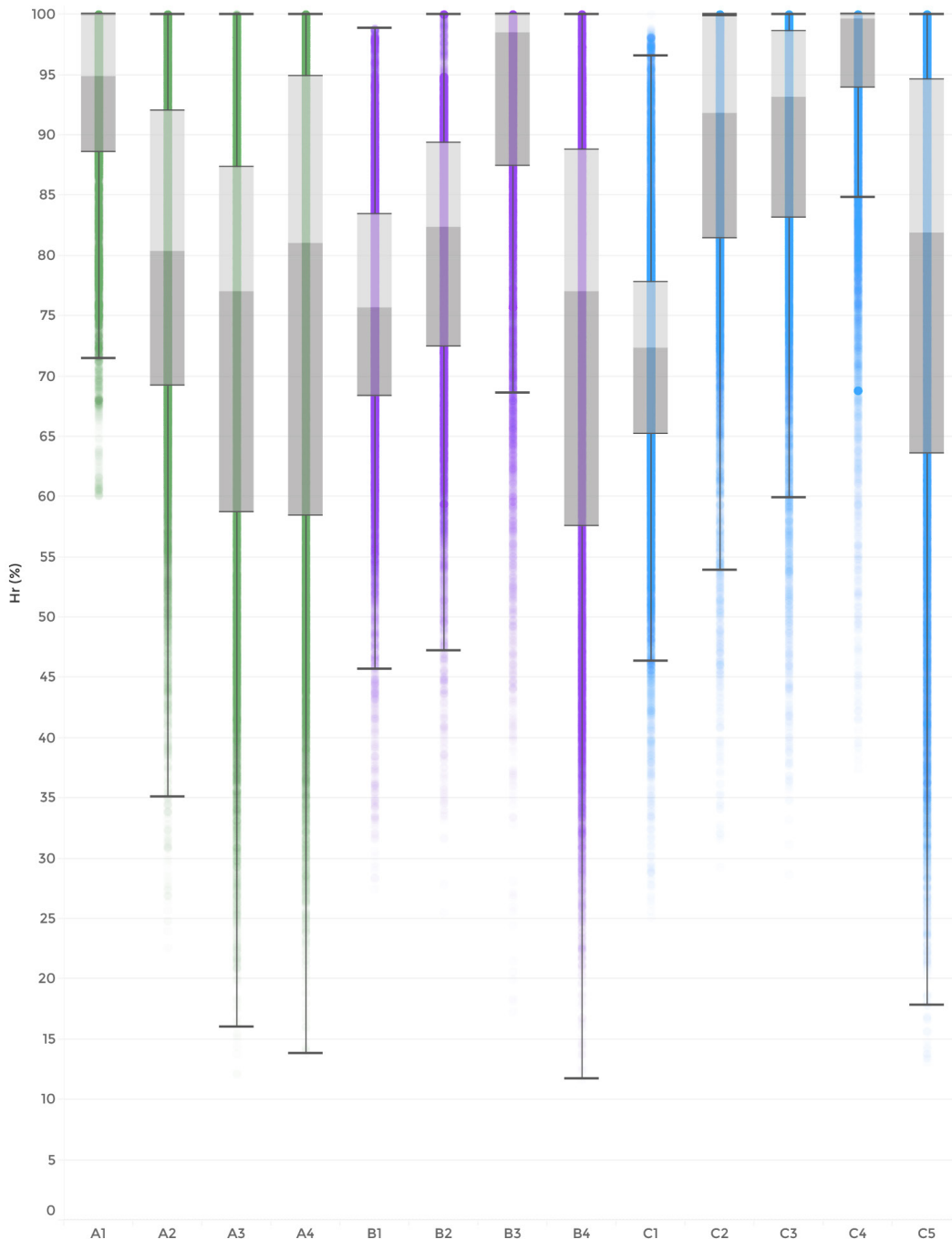


Figura 6.37. Diagrama de cajas con la distribución de los datos de humedad relativa (%) por sonda y por maqueta del 01/06/2021 al 31/05/2022.

Respecto a la humedad relativa de las sondas B1 y C1, la mediana se sitúa cercana al 75 %, siendo el valor medio de humedad exterior (según los datos de AEMET) del 76,43 %. Esto se debe a que, como se ha mencionado, estas sondas se encuentran más expuestas a las condiciones meteorológicas exteriores. En el caso de la sonda A1 se percibe un comportamiento anómalo, presentando humedades relativas muy elevadas, similares a los valores de las sondas B3 y C3, situados entre dos capas encargadas de almacenar agua: subs-



trato y capa drenante. En este caso, se considera que se puede haber producido una filtración de agua y/o un defectuoso drenaje de la maqueta, acumulándose humedad en la parte inferior de esta e influenciando en los datos recogidos por la sonda A1. Se puede observar que el perfil del límite inferior de las cajas es muy similar en las cubiertas ajardinadas: evaporación variable en la superficie de substrato (B4 y C5), en función de las condiciones del entorno y el agua disponible, concentración de valores elevados de humedad en la sonda inmediatamente inferior (B3 y C4) y descenso del límite inferior de los valores de humedad conforme las sondas se alejan de las capas encargadas de almacenar agua (substrato y capa drenante). En cambio, en el modelo A se alcanzan valores de humedad superficiales (A4) similares a los de los modelos ajardinados, pero el perfil del límite inferior es ascendente hasta alcanzar valores de humedad superiores al 70 % en todos los datos de la sonda A1. Al no producirse un almacenamiento de agua en ninguna capa de esta cubierta, los valores de mayor humedad se encuentran donde se acumula el agua que no se ha drenado correctamente, es decir, en las capas más inferiores. Al analizar este perfil podríamos concluir que el uso de sensores de temperatura y humedad puede ayudar a detectar posibles filtraciones o acumulaciones de agua bajo la lámina impermeable, mejorando la detección de goteras, su posible prevención y solución.

Una vez analizado el comportamiento general de los diferentes sistemas de cubierta, un estudio de los datos obtenidos en función de las condiciones ambientales puede permitir profundizar en los patrones de comportamiento térmico de los tres modelos de cubierta. Para ello se estudian los datos, en este caso por maqueta, distribuidos en los doce meses que ha durado la monitorización. El primero de los meses será junio de 2021 y el último mayo de 2022. A partir de la interpretación de los gráficos obtenidos, se puede diferenciar el comportamiento en tres épocas del año: junio a agosto, septiembre a febrero y marzo a mayo. De marzo a mayo se producen las mayores precipitaciones, acumulando en esos tres meses 307,8 mm, un 57,8 % de las precipitaciones totales de ese año. Se trata de un periodo de tres meses con un comportamiento propio de la época primaveral con elevadas y constantes precipitaciones, además de presentar unas temperaturas moderadas.

En el mes de marzo (figura 6.47), los datos de las tres maquetas se sitúan en elevados valores de humedad relativa. En el modelo C, la mayoría de los datos se agrupan en una humedad por encima del 85 %, presentando además una menor variación térmica (aproximadamente de 5 °C). El mismo patrón se repite en los modelos A y B, con la mayoría de los datos por encima del 80 % de humedad y con variaciones térmicas entre 5 y 8 °C. En abril (figura 6.48) y mayo (figura 6.49), las precipitaciones disminuyen respecto al mes de marzo, por lo que las gráficas presentan los valores menos agrupados, especialmente en valores elevados de humedad relativa. Esta dispersión de los datos se produce hacia el lado derecho, es decir, hacia mayores temperaturas, mientras que en el lado opuesto la mayoría de los datos se sitúan siempre por encima de los 10 °C, al igual que en marzo. Este comportamiento se debe al aumento progresivo de la temperatura ambiente, pero también ejemplifica gráficamente el fenómeno de la evapotranspiración.

En el caso del modelo A, cubierta sin ajardinar, en marzo se presenta una mayor dispersión de datos, especialmente con tendencia a las temperaturas más elevadas. En este caso, una mayor acumulación de humedad responde a lluvias continuadas que no permiten que se sequen las diferentes capas de la cubierta invertida con acabado de grava, así como al posible fallo en el drenaje, como se ha comentado previamente. En los meses de abril y mayo esta dispersión se hace progresivamente más evidente. En abril, el modelo A alcanza temperaturas de 38 °C en algunos casos, 4 °C y 1 °C por encima de los modelos B y C respectivamente. En el mes de mayo, alcanza los 43 °C, al igual que el modelo B, y 12 °C por debajo de los valores del modelo C. En el caso de las cubiertas ajardinadas autosuficientes, tanto el modelo B como el modelo C, la mayor disponibilidad de agua en el mes de marzo permitió que los datos se distribuyeran más concentrados y a menor temperatura. En cambio, en los meses sucesivos se aprecia cómo, a pesar de presentar todavía valores situados en una humedad relativa del 100 %, la mayoría de los datos se dispersan hacia humedades relativas menores y temperaturas mayores. Estas elevadas temperaturas, muy por encima de la temperatura del aire, corresponden con las sondas ubicadas en la superficie (B4 y C5). Con la disminución de la humedad disponible en las maquetas se produce una disminución de las pérdidas de calor en el substrato derivadas de la evaporación, por lo que se acumula más cantidad de calor en esta capa y se alcanzan temperaturas superficiales superiores. Aun así, la máxima temperatura en los modelos B y C se mantiene por debajo de la temperatura máxima del modelo A durante el mes de abril.



## 6. Monitorización con sensores en modelos a escala

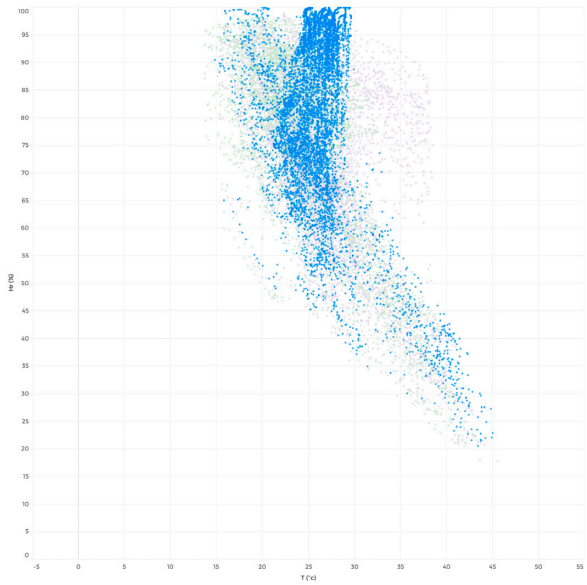
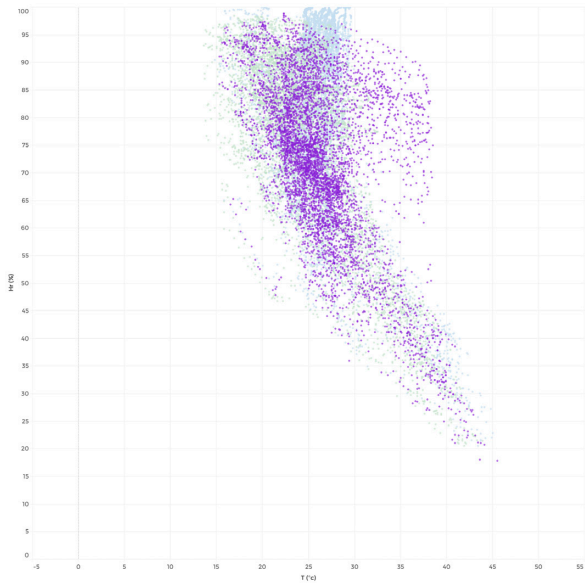
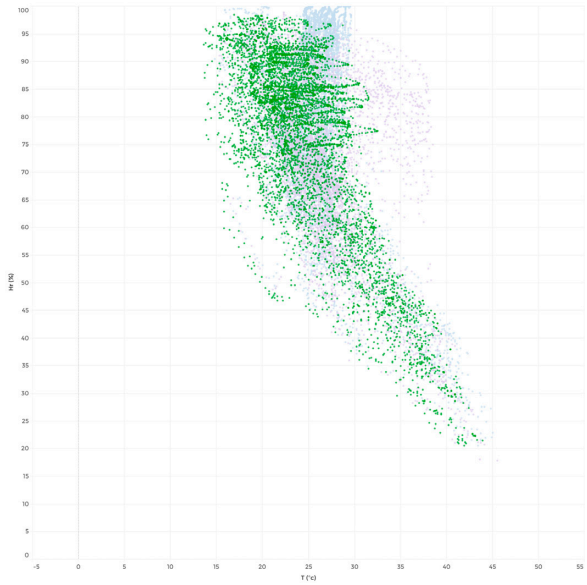


Figura 6.38. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de junio.

Figura 6.39. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de julio.



En el mes de mayo las precipitaciones se han reducido respecto a los dos meses anteriores y la temperatura del aire ha aumentado. En el caso del modelo C, se produce un aumento de la dispersión de los datos, con una clara tendencia a la disminución de la humedad relativa y el aumento de la temperatura, llegando a alcanzar temperaturas mayores a las del modelo A sin ajardinar (debido a diferencias en el albedo entre el substrato oscuro y las gravas claras). En el caso del modelo B, en cambio, todavía se observa una destacable concentración de datos con una humedad cercana al 100 %, alcanzando temperaturas significativamente por debajo del modelo C.

Esta diferencia entre el modelo de cubierta ajardinada extensiva (B) e intensiva (C) parece contradictorio con la mayor capacidad de almacenamiento de agua de la cubierta intensiva. Pero en este caso, el tipo de vegetación podría estar jugando un doble papel fundamental. Por un lado, después de 9 meses con poca disponibilidad de agua, especialmente en los meses iniciales de junio a julio cuando este factor se unía a elevadas temperaturas, parte de la vegetación del modelo C, con más requerimientos de agua, se ha secado y no ha revivido en el periodo de marzo a mayo (véase apartado 6.5). Menor densidad de la capa de vegetación implica menor sombra y protección del substrato, por lo que se produce una mayor incidencia de la radiación solar, mayor evaporación y, derivado de la limitada disponibilidad de agua, un aumento de la temperatura superficial. También se indicó que, en este último periodo, la vegetación superviviente presenta un crecimiento rápido, lo que implica un elevado consumo de parte del agua almacenada, evitando que esta se emplee en el proceso de evaporación. En cambio, la vegetación suculenta del modelo B ha presentado una menor tasa de mortalidad, unido a un mayor porcentaje de refluoración tras un periodo seco. Por lo que la maqueta B, a pesar de tratarse de vegetación con un menor LAI, presenta una mayor cubrición del substrato, protegiéndolo, y, aunque en el periodo de lluvias la vegetación experimenta un mayor crecimiento, las especies *sedum* tienen un consumo menor y más equilibrado del agua disponible (véase apartado 4.1.11).

Por otro lado, en los meses de junio a febrero, la disponibilidad de agua es menor, con lluvias más dispersas y de menor cantidad que las producidas, especialmente, en marzo. Durante los meses de junio a agosto (figuras 6.38, 6.39 y 6.40), el grueso de los datos del modelo A se ubica entre el 65 % y 95 % de humedad, mientras que en los meses de septiembre a febrero se concentran por encima del 80 %. Las elevadas temperaturas y radiación solar que se producen en València en los meses de junio a agosto producen una desecación del modelo A, sin capas de almacenamiento de agua. Por lo tanto, en esta maqueta, la humedad es menor en los meses cálidos, con valores cercanos a la media de humedad exterior durante esos meses (80,6 %). En los meses fríos, en cambio, la disminución de las temperaturas junto a posibles problemas de drenaje, con acumulación de agua en capas inferiores, conllevan que se genere y mantenga durante más tiempo una mayor cantidad de humedad en las diferentes capas de la maqueta A (especialmente en capas inferiores, tal como se ilustra en la figura 6.37). Esta tendencia continuará en marzo, disminuyendo la humedad a partir de abril debido al aumento de temperaturas, como se ha indicado. Al tratarse de una cubierta tradicional sin ajardinar, esta presencia de agua no implica mecanismos de disipación de calor, como la evapotranspiración, por lo que en todo el periodo estudiado (de junio a mayo) hay mayor densidad de datos en valores altos de temperatura que en los modelos ajardinados.

El modelo B presenta un perfil de funcionamiento diferente debido al fenómeno de la evapotranspiración. De junio a agosto, los datos se agrupan entorno a valores de humedad ligeramente inferiores a las del modelo A. Esto puede deberse a que, a pesar de que la vegetación suculenta ha disminuido su consumo de agua (derivado de la limitación de la evapotranspiración y la acumulación de agua en sus hojas), la humedad almacenada se consume en la supervivencia de la vegetación y en la evaporación del substrato. Esto explica que haya menor densidad de datos a elevadas temperaturas, en comparación con el modelo A. Esta justificación se puede confirmar profundizando en el comportamiento del modelo C. Esta maqueta, con mayor capacidad de almacenamiento de agua concentra sus datos en una franja de humedad entre el 60 % y el 100 %, con mayor densidad de datos en humedades altas en comparación con los modelos A y B, y presenta también menor densidad de puntos en temperaturas elevadas que los dos modelos anteriores. El agua almacenada en esta maqueta se ha empleado para la supervivencia de la vegetación y para la evaporación del substrato, al igual que en el caso del modelo B, pero en esta maqueta la disponibilidad de agua es mayor, como se observa en los valores de humedades relativas más altas detectados. Especialmente en épocas cálidas, como es el caso de los meses de junio a agosto, se puede apreciar el potencial de aislamiento de las





## 6. Monitorización con sensores en modelos a escala

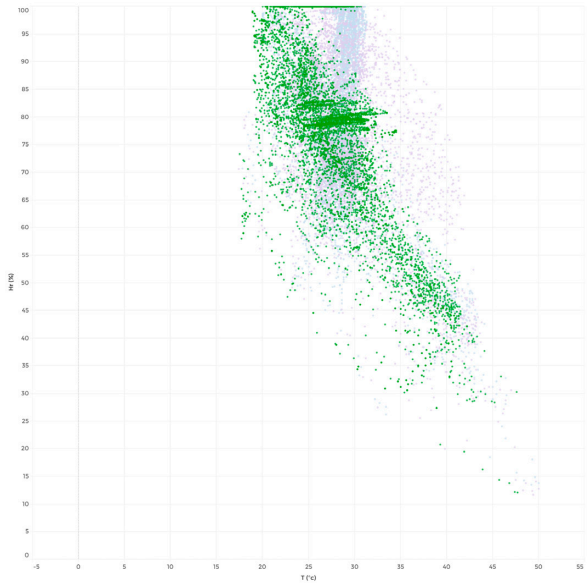


Figura 6.40. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de agosto.

Figura 6.41. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de septiembre.



cubiertas ajardinadas. En el modelo A los datos se encuentran más dispersos dentro del eje de temperatura, mientras que en el modelo B hay menor densidad de datos especialmente en las altas temperaturas (debido al factor de la evapotranspiración, a pesar del limitado contenido de agua). En el modelo C los datos se encuentran mucho más concentrados, entre 20-25 °C y 30 °C, reduciendo los picos de temperatura, especialmente en la superficie de la cubierta, que se traducirán en una disminución de los flujos de calor positivos hacia el interior de la vivienda, no deseados en verano.

Respecto a los meses de septiembre a febrero (figuras 6.41, 6.42, 6.43, 6.44, 6.45 y 6.46), los cuales vamos a considerar parte de la misma época (seca y con una temperatura ambiente más baja) debido a que los datos de estos meses presentan un perfil similar entre sí, podemos observar que en ambos modelos ajardinados (B y C) las gráficas presentan una línea superior con datos en diferentes temperaturas y una humedad relativa del 100 %. En el caso del modelo B, bajo esta línea se produce una franja sin datos, los cuales se agrupan por debajo del 95 % de humedad, aproximadamente. Este límite baja ligeramente en meses como diciembre o febrero, en los cuales se han producido precipitaciones totales de 0,3 mm y 3,3 mm, respectivamente. Tan solo un 0,05 % y un 0,62 % del total de precipitaciones anuales. Este umbral asciende a partir de marzo, inicio de la época con más precipitaciones.

Así como los datos de la maqueta del modelo A se ubican, de septiembre a febrero, principalmente en humedades relativas superiores a las de los meses de junio a agosto (debido a la disminución de la temperatura ambiente), en el caso del modelo B los datos se concentran entorno a humedades menores a las de los meses cálidos, con la excepción de la franja al 100 % de humedad. Esto se puede relacionar con la propia estructura de la cubierta ajardinada y las características climáticas de València. En primer lugar, los datos ubicados en la franja a 100 % de humedad se corresponden con la sonda B3, situado entre el substrato y la capa drenante. En este caso, debido a la menor temperatura ambiente la humedad acumulada en estas dos capas de almacenamiento de agua no se consume con tanta facilidad como en la época cálida, a pesar de que no se produzcan lluvias. Es por ello que esta sonda presenta datos con 100 % de humedad, pero en un margen amplio de temperaturas, ya que se ubica bajo 10 cm de substrato y sobre la capa de material aislante, estando térmicamente poco protegido. Respecto al resto de datos, cabe considerar que, a pesar de la disminución de la temperatura ambiente, la ciudad de València presenta elevados valores de radiación solar durante todo el año. Esta radiación, incidiendo sobre el substrato de color oscuro, tiende a aumentar su temperatura (mucho más que en el caso de las gravas de color más claro del modelo A), que será contrastada con la evaporación del agua disponible en el substrato y la capa drenante para limitar el aumento de la temperatura superficial y los flujos de calor negativos hacia el interior de la cubierta. Es por ello que los datos se agrupan entorno a valores de humedad relativa más bajos que en el modelo A sin ajardinar, pero hay menor densidad de valores a temperaturas altas, ya que el agua disponible se consume en la evaporación del substrato que absorbe la radiación solar.

El modelo C sirve para confirmar estas conclusiones. En este caso, se detecta, al igual que en el modelo B, una línea con datos a diferentes temperaturas, pero todos con una humedad relativa del 100 %. Cabe destacar que, en este caso, el rango de temperaturas de los datos ubicados al 100 % de humedad relativa es menor que en el modelo B, al tratarse principalmente de la sonda C4, ubicada bajo 30 cm de substrato y, por lo tanto, térmicamente más protegida que la sonda B2. Bajo esta línea, los datos se agrupan de forma bastante homogénea desde una humedad relativa del 100 % hasta una humedad del 45-50 %. En este caso, la capacidad de almacenamiento de agua es mayor por lo que hay datos en valores de humedad relativa mayores (en comparación con el modelo B) y menor densidad de datos en temperaturas elevadas gracias a la mayor evaporación del substrato (en comparación con el modelo A y B).

Respecto a las temperaturas más bajas, los modelos ajardinados también presentan menor densidad de datos que en el caso del modelo sin ajardinar, aunque no es tan evidente como en las altas temperaturas. Esto confirma que las cubiertas ajardinadas funcionan mejor como elemento de enfriamiento. La elevada radiación solar en València y el color oscuro del substrato ayudan a que haya menor cantidad de datos en temperaturas frías. También la vegetación es capaz de generar una capa de protección que impida el contacto de la capa exterior del substrato con la temperatura ambiente más baja. En este caso, es más eficiente la vegetación *sedum* del modelo B, ya que es tapizante y no genera un colchón de aire entre vegetación y substrato en el cual pueda entrar aire frío del exterior, especialmente en horas nocturnas. Por ello, aunque

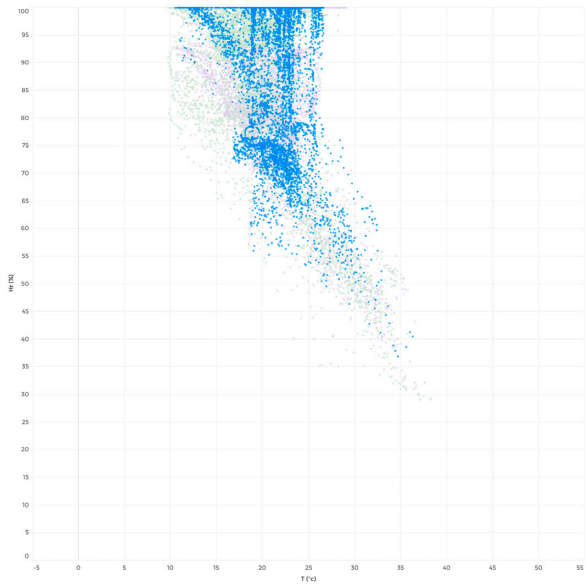


Figura 6.42. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de octubre.

Figura 6.43. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de noviembre.



ambas cubiertas ajardinadas presenten menores datos en valores bajos de temperatura, el modelo B funciona ligeramente mejor que el modelo C para aislar respecto al frío en invierno.

De estos gráficos se puede concluir que a mayor contenido de humedad almacenada en el sustrato y la capa drenante de los modelos B y C, menor amplitud térmica. Además también presentan mayor concentración de los datos, junto con una menor densidad de datos en temperaturas altas, todo ello gracias a la evaporación del sustrato. En cambio, en el modelo A se comprueba que una mayor acumulación de humedad no se traduce en menor amplitud térmica de los datos y, sobre todo, no se observa una menor densidad de datos en temperaturas elevadas. Este comportamiento de las cubiertas ajardinadas resulta especialmente interesante en climas como el mediterráneo, seco y con elevada radiación solar, siendo más importante el control de las altas temperaturas que no el aislamiento frente a bajas temperaturas. También se puede apreciar como la mayor capacidad de almacenamiento de agua del modelo C no supone una gran diferencia térmica respecto a los datos del modelo B, al tratarse de una cubierta autosuficiente, especialmente en meses o épocas sin precipitaciones. En los meses de más lluvia, como por ejemplo marzo, sí que se percibe mayor diferencia, especialmente entre las altas temperaturas alcanzadas por ambas maquetas.

La supervivencia de la vegetación también juega un papel importante en las temperaturas superficiales alcanzadas en el sustrato. Una mejor implantación y menor mortalidad de las especies, sobre todo en épocas de pocas precipitaciones, supondría una diferencia mayor en el comportamiento térmico de los modelos ajardinados, respecto al modelo tradicional con acabado de grava.

#### **6.6.2.1 Análisis de un día cálido: 12 de julio 2021**

Para un análisis más detallado del comportamiento de las diferentes cubiertas en épocas cálidas y frías, se ha escogido un día cálido representativo del periodo estudiado, así como un día frío, tal y como se ha llevado a cabo en investigaciones consultadas en la bibliografía y detalladas en el apartado 3.1. En ambos casos, coinciden con periodos de escasas precipitaciones, por lo que se pone a prueba el sistema de evapotranspiración en cubiertas ajardinadas autosuficientes. En el primer caso, se analiza el comportamiento de los modelos A, B y C el día 12 de julio de 2021. Se trata de un día en el que no se produce una elevada variación en la temperatura del aire, con una máxima de 32,63 °C a las 13:00 h y una mínima de 22,78 °C a las 06:00 h, coincidiendo con los primeros valores de radiación solar. Se trata, por lo tanto, de un día con elevadas temperaturas que se mantienen incluso en las horas nocturnas, hecho que va a favorecer el consumo de agua almacenada para enfriar la superficie de la cubierta incluso en horas posteriores a la puesta de sol. La máxima temperatura ambiente se produce una hora después del pico de radiación solar, con 936 W/m<sup>2</sup>, a las 12:00 h. A las 15:00 h se produce una caída de la radiación solar para ascender luego de nuevo, debido a posibles nubosidades que no implican precipitaciones a lo largo del día 12 de julio.

En la figura 6.50 se puede observar cómo, en el modelo C de cubierta ajardinada intensiva, la mayoría de los datos se agrupan entre los valores de humedad del 65 % y el 100 % y entre temperaturas de 26 °C y 32 °C. La amplitud térmica de la mayoría de los datos del modelo C es de 6 °C, con una concentración baja de datos por encima de los 30 °C (especialmente en comparación con los modelos A y, sobre todo, B). Los mayores valores de humedad responden a una mayor capacidad de almacenamiento, hecho que se traducirá en una mayor evaporación del sustrato orientada a rebajar la temperatura de la superficie, pero también a la supervivencia de la vegetación, ya que las especies empleadas en esta maqueta, de tipo arbustivo, tienen necesidades hídricas mayores que las plantas suculentas (modelo B). En el modelo B se produce una menor evaporación del sustrato, lo que provoca una variación térmica mayor, aproximadamente de 8 °C, con una densidad de datos por encima de los 30 °C superior al modelo A y, sobre todo, al modelo C. En relación con la cubierta tradicional sin ajardinar, la escasa evaporación de la cubierta extensiva autosuficiente (B), con limitada cantidad de agua, no llega a compensar el hecho de que las gravas de acabado del modelo A presentan un albedo mayor y una absorción menor de radiación solar.

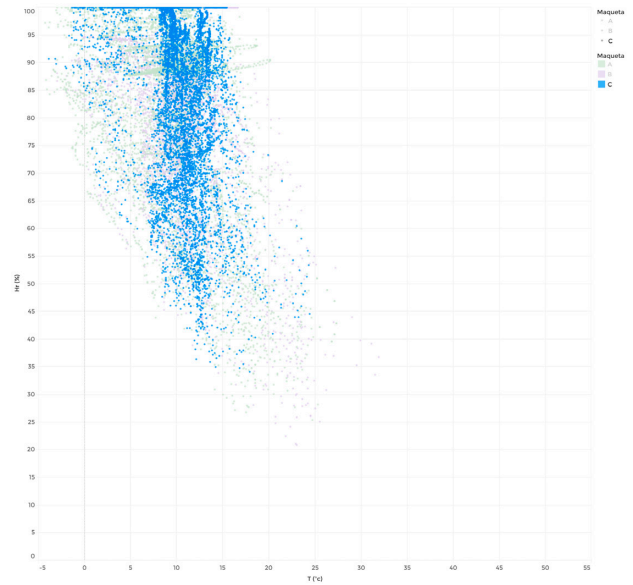
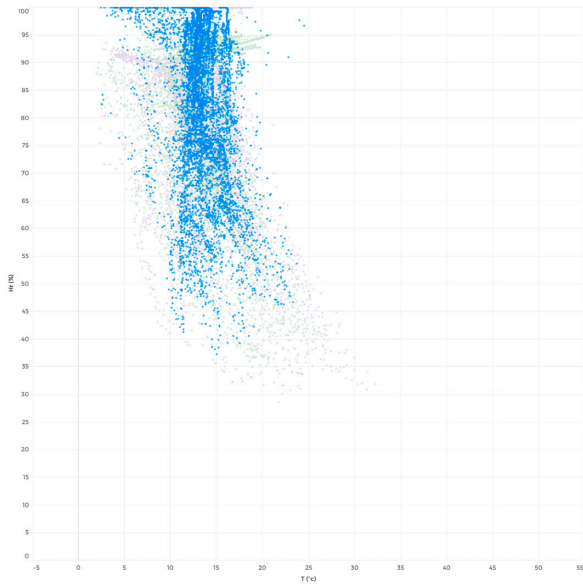
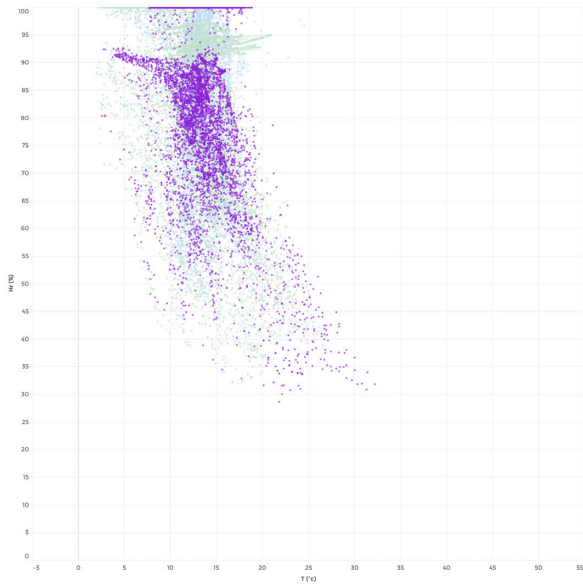
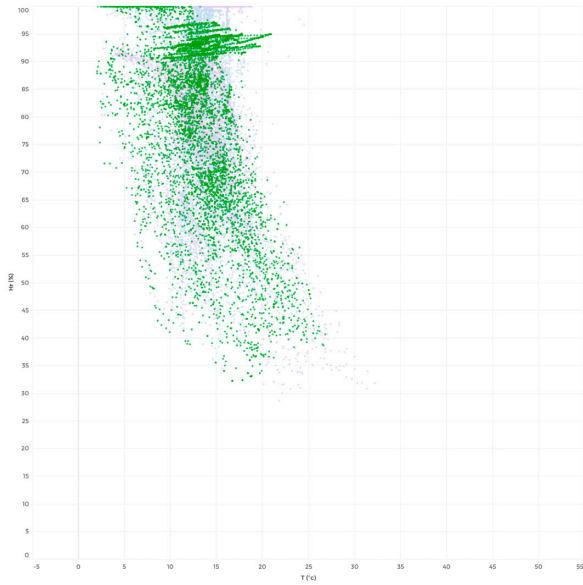


Figura 6.44. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de diciembre.

Figura 6.45. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de enero.

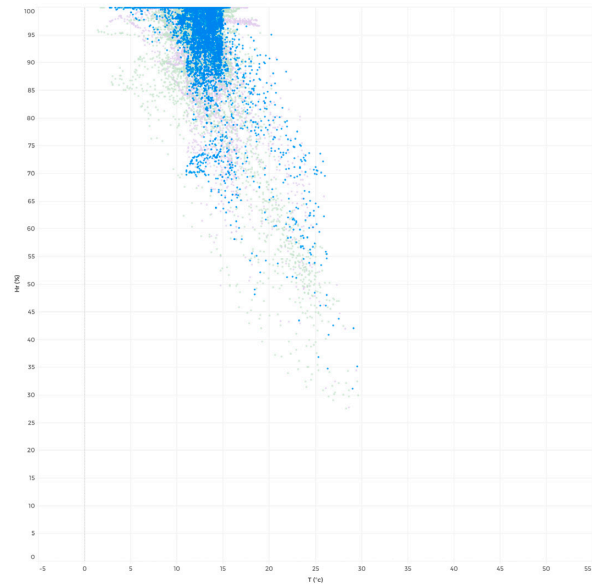
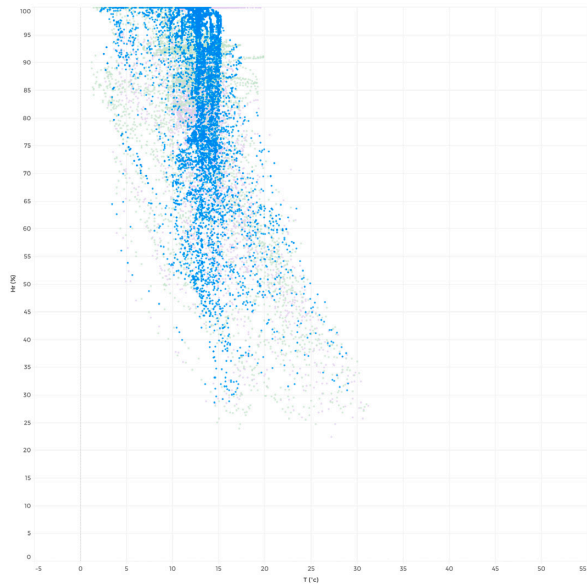
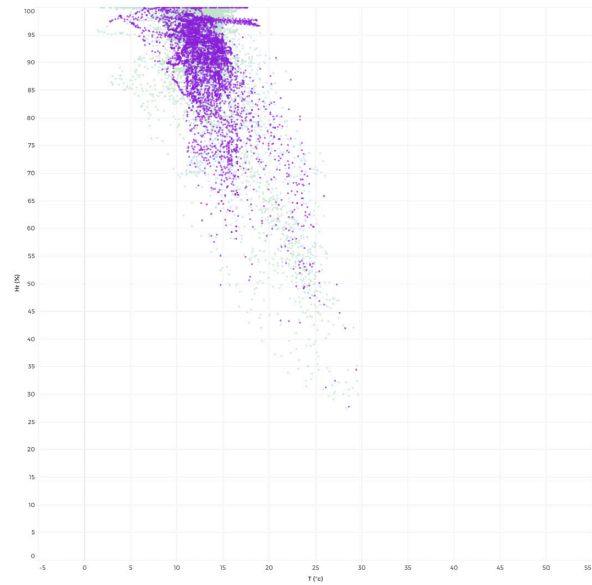
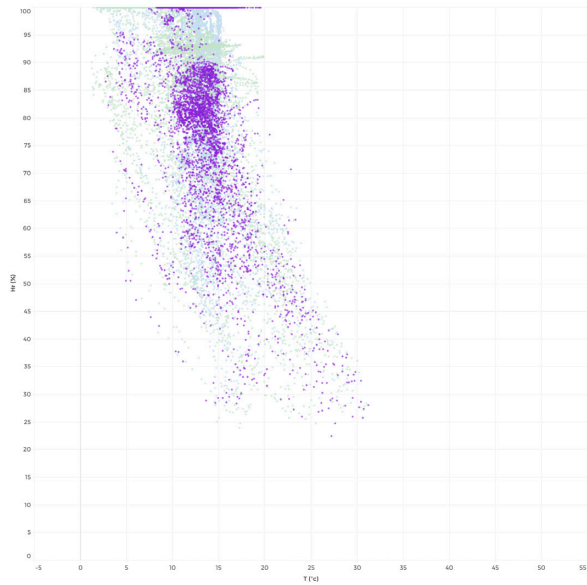
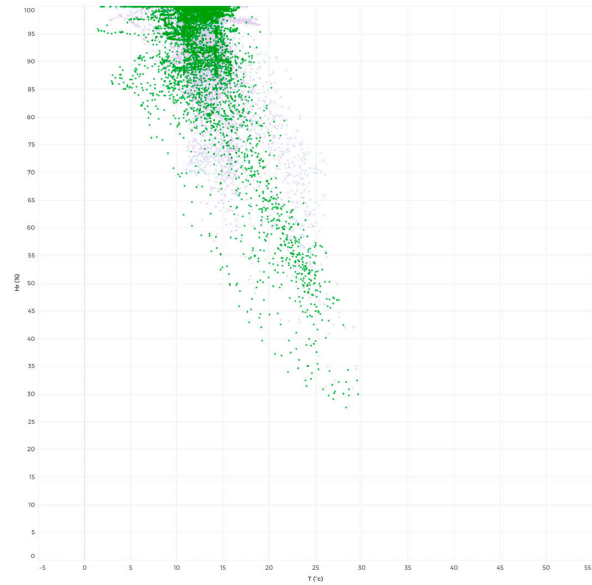
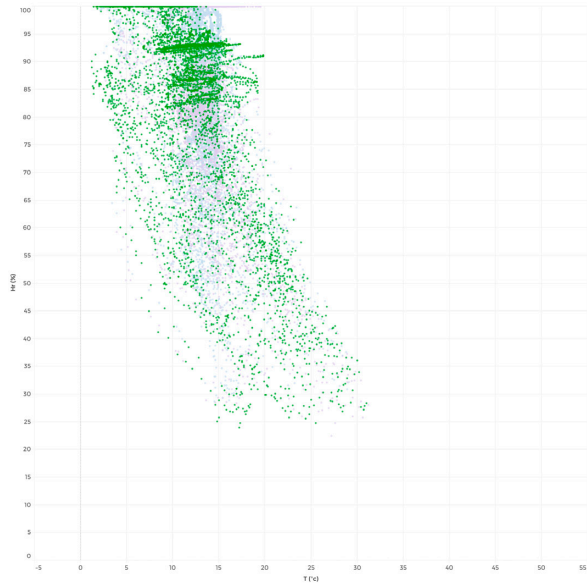


Figura 6.46. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de febrero.

Figura 6.47. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de marzo.



## 6. Monitorización con sensores en modelos a escala

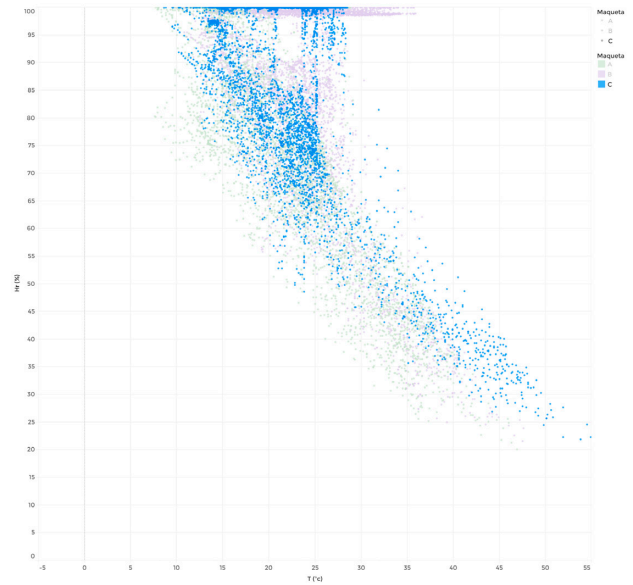
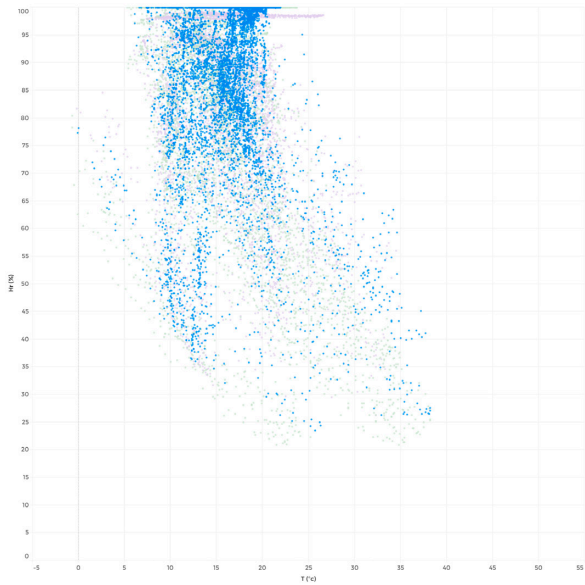
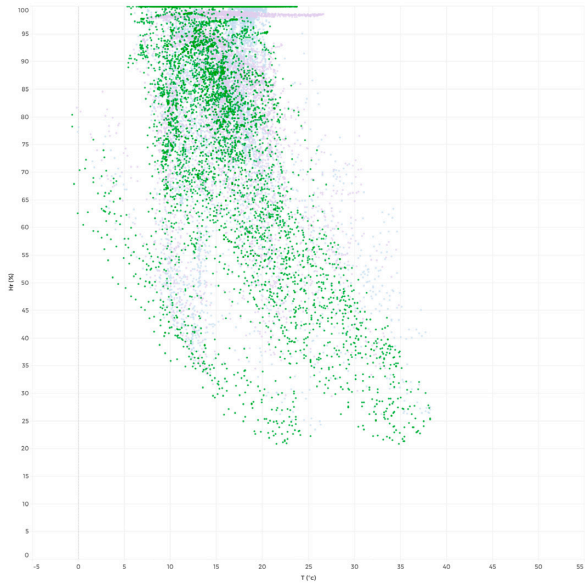


Figura 6.48. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de abril.

Figura 6.49. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de mayo.

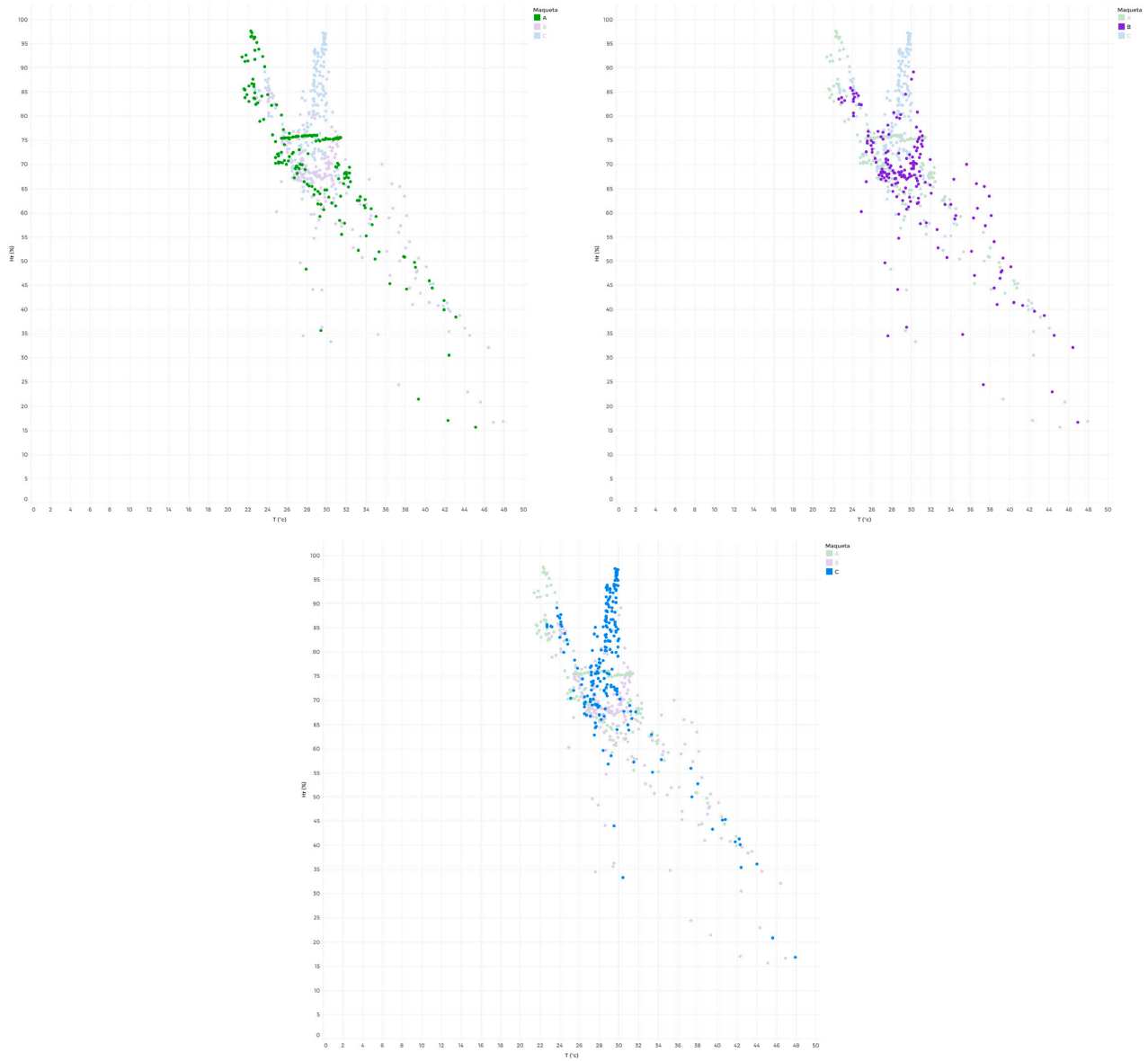


Figura 6.50. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el día 12 de julio de 2021.

La evaporación del sustrato es, en cubiertas ajardinadas autosuficientes, un mecanismo limitado de control de la transmisión térmica a través de la cubierta, por lo que es necesario analizar su comportamiento y estudiar otros factores influyentes. Especialmente en casos con poca aportación de agua de precipitaciones, ya que en los 18 días previos al 12 de julio tan solo se han registrado 1,8 mm de lluvia, el día 7 de julio. De acuerdo con Zheng *et al.*<sup>125</sup>, que estudiaron el comportamiento de cubiertas ajardinadas autosuficientes en los primeros 14 días después de un fenómeno lluvioso, a los 5 días sin precipitaciones la reducción de la humedad del sustrato llega a mínimos, lo que indica también una mínima evaporación del sustrato y pérdidas de calor por evapotranspiración.

En primer lugar, al comparar las figuras 6.52 y 6.53, se percibe que la humedad relativa detectada decae principalmente en las horas centrales del día. Estos datos coinciden con las conclusiones de Berretta *et al.*<sup>126</sup>, que asociaron las fluctuaciones diurnas de temperaturas con la creciente pérdida de humedad en el sustrato por evaporación en las horas de mayor temperatura y radiación solar. Por lo tanto, la cantidad de humedad contenida en el sustrato, junto a la temperatura ambiente y la radiación solar determinan la ratio

125 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., et al. 2022.

126 Berretta, C., Poë, S., Stovin, V. 2014.





de evapotranspiración, así como la presencia de la vegetación<sup>127</sup>. La humedad de la sonda B4 cae hasta el 19,85 % a las 12:00 h, coincidiendo con el pico de radiación solar. En cambio, la humedad en la superficie de la cubierta C (C5) no baja del 26,55 %, alcanzado a las 13:00 h, una hora después de la máxima radiación solar. Esta mayor humedad detectada por la sonda C5 indica una mayor evaporación del sustrato en relación con el modelo B de cubierta ajardinada extensiva. Los valores más altos de evaporación se deben al mayor almacenamiento de agua del modelo C, el cual produce valores más elevados y casi constante de humedad relativa en las sondas C2, C3 y C4 hasta las 13:00 h. Además, en julio la mayoría de la vegetación del modelo C todavía está viva. Esta vegetación, densa, fomenta las pérdidas de calor por evaporación en el sustrato de acuerdo con Berretta *et al.*<sup>128</sup> Por último, la elevada temperatura ambiente y la radiación solar influyen en las mayores pérdidas de calor por evaporación. Como se puede observar, durante las horas de radiación solar (de 06:00 h a 21:00 h), la humedad relativa presenta un perfil inverso a la temperatura superficial de la cubierta y la radiación solar (figuras 6.55 y 6.56).



Figura 6.51. Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 12 de julio de 2021.



Figura 6.52. Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 12 de julio de 2021.

127 *Ibidem*.

128 Berretta, C., Poè, S., Stovin, V. 2014.

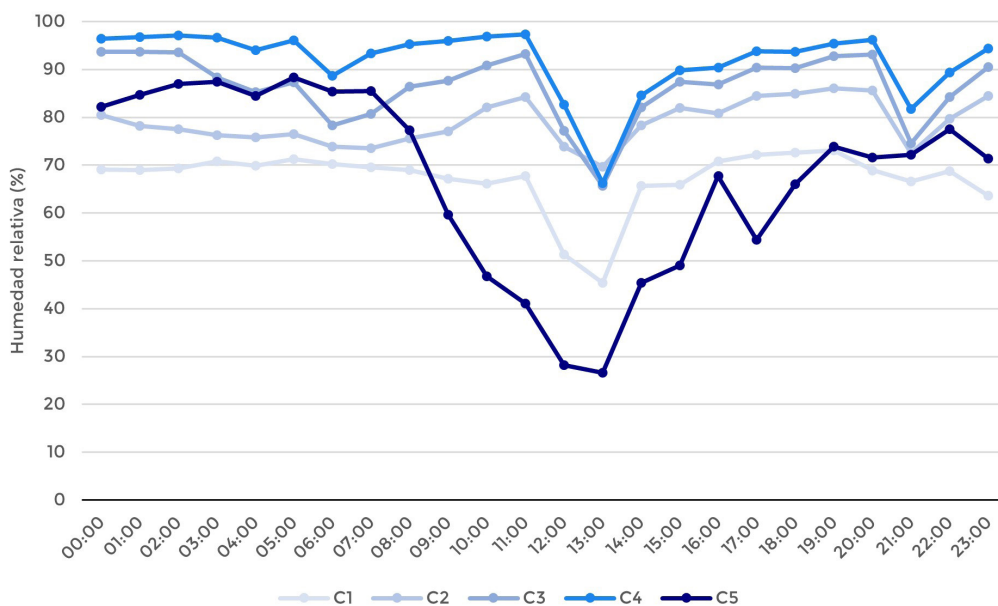


Figura 6.53. Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 12 de julio de 2021.

Otros picos de bajada de humedad, menos pronunciados, se producen a las 06:00 h y 21:00 h. En el primer caso, las sondas C3 y C4 han experimentado un pequeño pico de bajada de humedad a las 06:00 h, coincidiendo con los primeros valores de radiación solar del día y el inicio de las actividades metabólicas de la vegetación (fotosíntesis), ya que este es el momento de mayor consumo de agua por parte de la vegetación, produciendo una pérdida de humedad en las sondas ubicadas dentro y bajo el sustrato. La sonda C2, sobre la lámina impermeable, no experimenta este pico, ya que no se ubica en una capa de almacenamiento de agua a la cual tengan acceso directo las raíces de la vegetación en momentos de necesidad de agua. En el segundo caso, a las 21:00 h, se produce un nuevo pico de desecación, en este caso detectable en las sondas C2, C3 y C4. Tras este pico, a las 22:00 h, al igual que ha ocurrido a las 14:00 h tras la bajada de humedad de las 13:00 h, se produce un aumento considerable de la humedad relativa detectada por la sonda C5. Es decir, se ha producido un aumento de la evaporación del sustrato. Se contrarresta así la elevada temperatura ambiente, ya que, a pesar de no haber radiación solar a esas horas, se mantienen temperaturas elevadas también a lo largo de las horas nocturnas (figura 6.56).

En el modelo B (figura 6.52) el pico de caída de humedad no se detecta a las 06:00 h, ya que las especies vegetales tipo suculentas consumen menor cantidad de agua, especialmente en épocas de estrés hídrico con poca disponibilidad de agua, recurriendo en esos casos al agua almacenada en las hojas. En cambio, el pico de caída de humedad detectado a las 12:00 h en las sondas B2 y B3 es más pronunciado que en el caso de las sondas C2, C3 y C4, ya que hay menos disponibilidad de agua en los 10 cm de sustrato y la capa drenante. A las 21:00 h también se produce una disminución de la humedad relativa, al igual que en el modelo C, pero en este caso solo se produce en la sonda B2, mientras que la sonda B3 aumenta su humedad. Esto puede deberse a que queda poca agua disponible en la lámina drenante y el sustrato (la sonda B3 se ubica entre estas dos), por lo que el agua acumulada sobre la lámina impermeable (B2) se empieza a evaporar y ascender a capas superiores, aumentando la humedad de la sonda B3. La sonda B4 experimenta un aumento en los valores de humedad relativa, derivados de esta evaporación hacia capas superiores y en el sustrato, para disipar el calor acumulado.

Los valores de humedad en el modelo A (figura 6.51) muestran que no existe un almacenamiento de agua en esta cubierta, ya que el perfil de humedad relativa de las sondas A3 y A4 es muy similar, mientras que la sonda A2 experimenta menor variación de humedad debido a su ubicación bajo la capa de material aislante. Al igual que ocurre con las sondas B2 y C2 la atenuación de la variación térmica gracias a la capa de material aislante disminuye las variaciones de humedad. En el caso del modelo A, además, este agua no se requiere para el uso de la vegetación o el enfriamiento de la superficie de la cubierta por evaporación, lo que hace que la humedad de la sonda A2 varíe en menor proporción que las sondas B2 y C2. En la figura



6.51, además, se puede confirmar las conclusiones mencionadas anteriormente respecto a problemas de filtración y/o mal drenaje de la maqueta A. Como se puede apreciar, la sonda A1 presenta una humedad constante, por encima del 75 %, lo que podría justificar la presencia ininterrumpida de agua bajo el cajón de maqueta que no llega a evaporarse (debido a que esta sonda se encuentra rodeado de material aislante).

Respecto a las temperaturas, la sonda C5 alcanza la temperatura máxima de 45,95 °C (figura 6.56), mientras que la sonda B4 alcanza los 45,6 °C. Estos valores tan similares, incluso mayores en el modelo ajardinado intensivo, a pesar de haber registrado mayores humedades relativas en la sonda C5 que en la B4 se pueden justificar debido al tipo de vegetación. La vegetación del modelo C, a pesar del elevado LAI, tiene menor poder de cobertura de la superficie que la vegetación tapizante del modelo B, además de encontrarse menos desarrollada y parcialmente seca (mortalidad del 100 % en la especie *armenia marítima*) debido a los largos periodos sin precipitaciones, las elevadas temperaturas y las necesidades hídricas de la vegetación (véase apartado 6.5). En el modelo extensivo, la vegetación, a pesar de tener menor LAI, cubre mayor superficie de la cubierta, protegiéndola, además de haberse desarrollado más y soportar mejor las condiciones de estrés hídrico propias de los meses cálidos y secos. El hecho de cubrir más superficie protege ligeramente el sustrato, consiguiendo una temperatura superficial menor (a pesar de que en el modelo C se produce más evaporación) y explica que la caída de temperatura que se produce a las 16:00 h, una hora después de la bajada puntual de la radiación, sea también menos acusada en el modelo B (figura 6.55).

Tras observar que la evaporación del sustrato es ligeramente mayor en el modelo C que en el modelo B, aunque en ambos casos muy limitada, cabe considerar un factor complementario que justifique la menor variación térmica del modelo C. La inercia de la capa de sustrato también ayuda a limitar la variación térmica, tal y como se puede apreciar en la figura 6.59. La sonda de la superficie, C5, experimenta una variación térmica de 23,05 °C, mientras que las sondas inferiores describen una trayectoria casi horizontal, a excepción de la sonda C1 que, tal como se indicó previamente, queda por debajo del cajón de maqueta y a pesar de situarse entre dos placas de aislamiento está más expuesta a las variaciones térmicas exteriores. En cambio, en el modelo B la principal caída de temperaturas se produce en la sonda B2, al ubicarse debajo de la capa de material aislante (figura 6.58). Al comparar las sondas ubicadas debajo de la capa de material aislante, la sonda B2 de la cubierta extensiva (con 10 cm de espesor de sustrato y 5 cm de XPS) presenta una variación térmica de 3,7 °C, mientras que la C2 de la cubierta intensiva (con 60 cm de espesor de sustrato y 4 cm de XPS) presenta una variación térmica de 2,8 °C. Esta menor variación térmica de la sonda C2 justifica los beneficios aportados por la inercia térmica del sustrato y el aumento de aislamiento de la cubierta, a pesar de utilizar una capa de material aislante mucho menor.

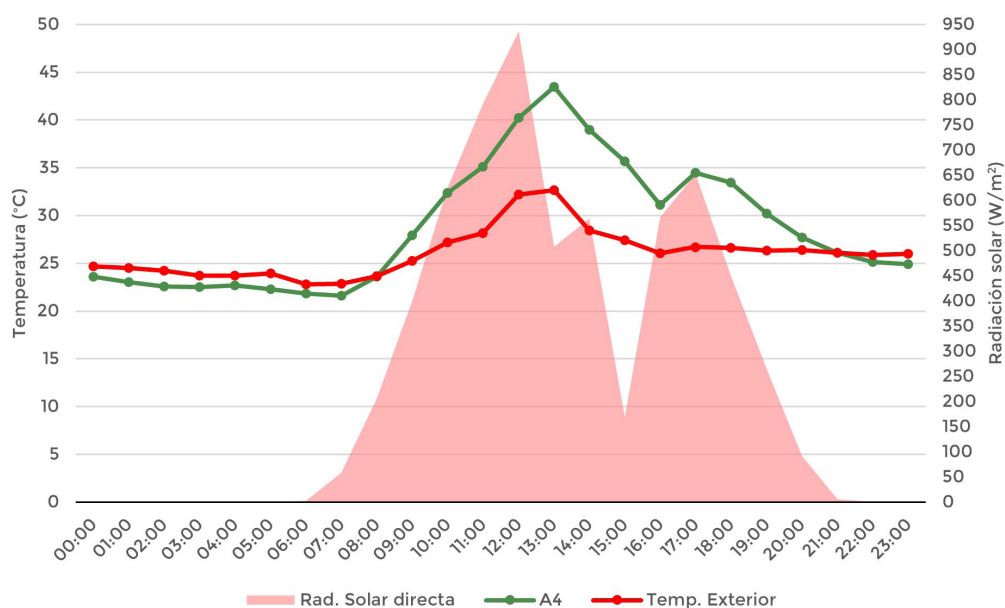


Figura 6.54. Temperatura (°C) superficial de la maqueta A, temperatura ambiente y radiación solar para el día 12 de julio de 2021.

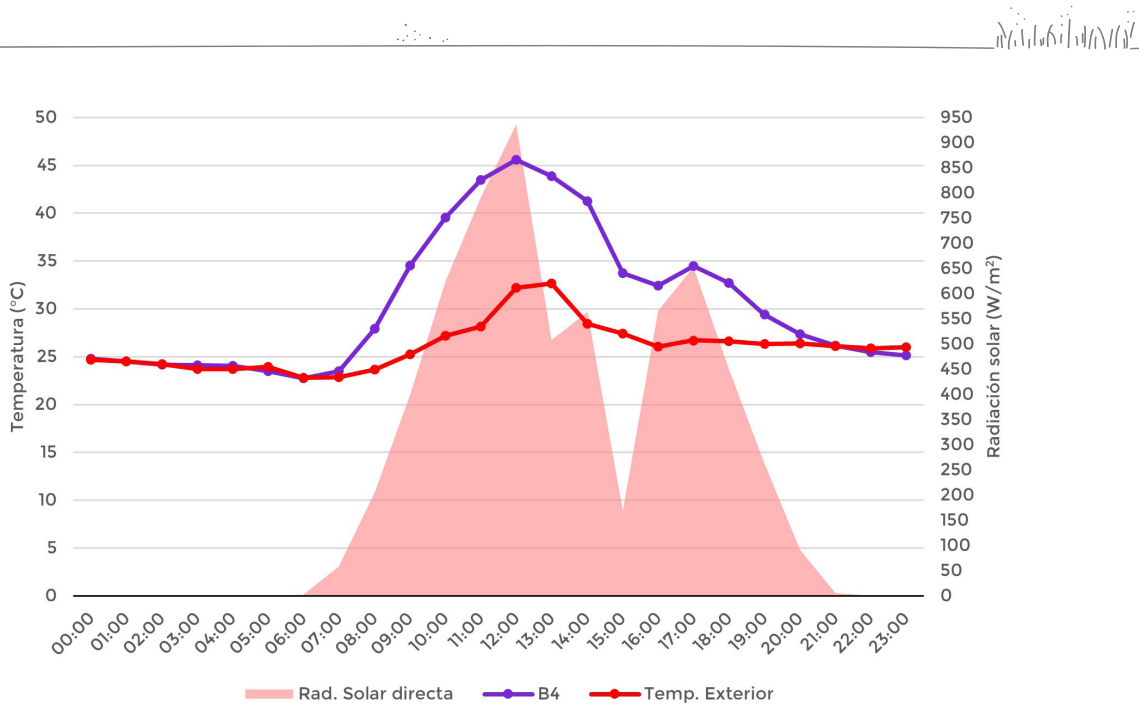


Figura 6.55. Temperatura (°C) superficial de la maqueta B, temperatura ambiente y radiación solar para el día 12 de julio de 2021.

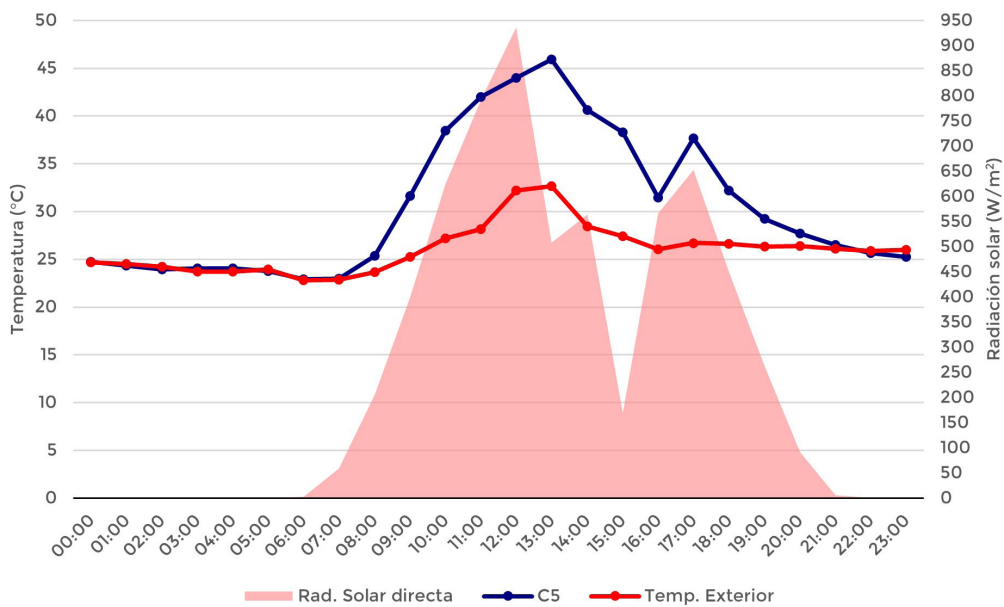


Figura 6.56. Temperatura (°C) superficial de la maqueta C, temperatura ambiente y radiación solar para el día 12 de julio de 2021.

En el caso del modelo A, en la figura 6.54 se ilustra como, a pesar de alcanzar temperaturas superficiales máximas por debajo de los modelos ajardinados (43,50 °C), la sonda A2 (bajo 8 cm de XPS) presenta una variación térmica de 7,2 °C (figura 6.57), 3,5 °C por encima de la variación de la sonda B2 y 4,4 °C por encima de la variación de la sonda C2, a pesar de que las tres cubiertas cumplen con el cálculo de transmitancia térmica exigido por normativa.

Se ha concluido que el principal mecanismo que hace de las cubiertas ajardinadas un sistema de enfriamiento, la evapotranspiración, no funciona en su máximo rendimiento en el caso de emplear una cubierta autosuficiente que pretenda minimizar el consumo de agua. En este caso, la disponibilidad de agua en capas intermedias, la sombra de la vegetación y, sobre todo, la inercia del sustrato fomenta que, en las capas interiores de la cubierta ajardinada se produzca una variación térmica menor. En este caso la cubierta ajardinada funciona principalmente como elemento aislante, no enfriador, hecho que puede producir factores negativos.

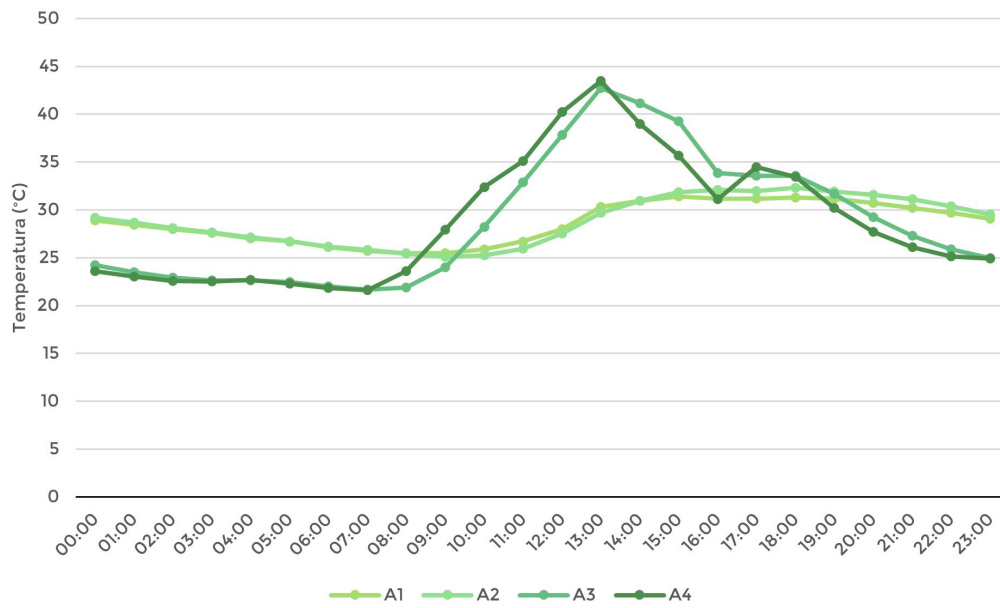


Figura 6.57. Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 12 de julio de 2021.

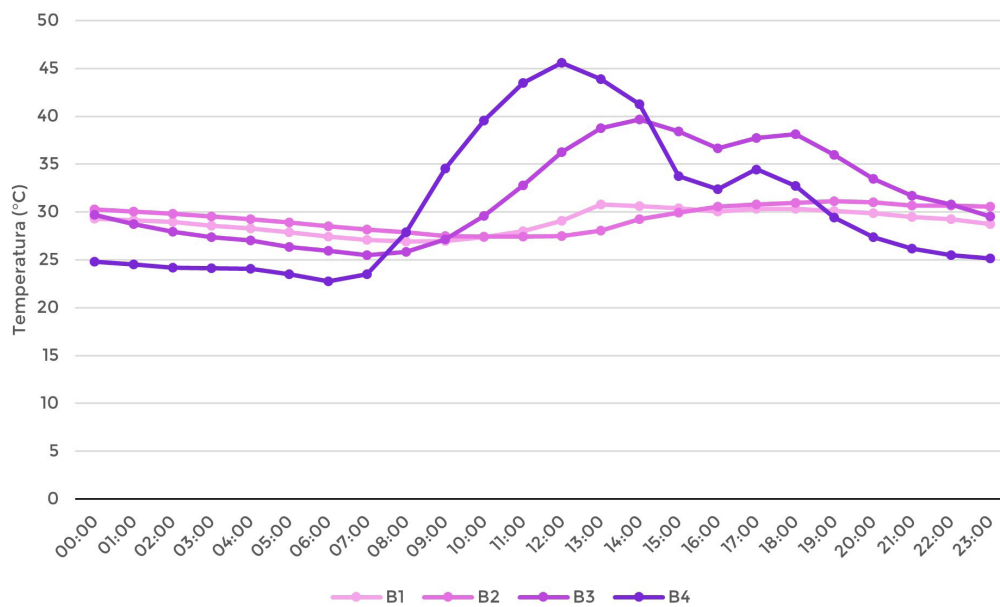


Figura 6.58. Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 12 de julio de 2021.

El aumento de la inercia térmica gracias al substrato, y la capa de vegetación como elemento aislante, impiden la disipación del calor al dificultar los flujos de calor positivos de salida del calor acumulado en el interior de una vivienda, especialmente en épocas cálidas y en momentos de bajada de la temperatura ambiente y radiación solar nula. En climas cálidos y con pocas precipitaciones, como el mediterráneo, especialmente en noches cálidas como la del día 12 de julio de 2021, este mecanismo de disipación de calor nocturno es muy deseable. En estos casos, es recomendable que el aumento de la inercia térmica vaya de la mano de un aumento de la ventilación<sup>129</sup>. Además, la disponibilidad de agua también juega un papel importante en la reducción del calor transmitido por la cubierta y acumulado en el interior. Por lo tanto, se genera la necesidad de encontrar un equilibrio entre el consumo de agua de la cubierta y la eficiencia energética de la vivienda. En estos casos, la cubierta ajardinada extensiva será la que menor cantidad de agua consuma, además de haber demostrado una supervivencia de la vegetación mayor y un comportamiento térmico similar a la cubierta intensiva en el caso de limitado contenido de agua. Este menor consumo se deberá a la menor capacidad de almacenamiento de agua y a las menores necesidades hídricas de la vegetación instala-

129 Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., et al. 2022a; 2022b.



da. En épocas cálidas, la disposición de un sistema de riego mejorará el comportamiento de la cubierta como elemento enfriador. Esto se debe a la mayor disponibilidad de agua que permitirá aumentar las pérdidas de calor por evaporación del sustrato (especialmente) y por evapotranspiración de la vegetación. Mayores pérdidas de calor por evapotranspiración en las capas de vegetación y sustrato implicarán una menor temperatura superficial exterior, especialmente en momentos de elevada incidencia de la radiación solar. Esto supone, a su vez, una menor transferencia de calor al interior, limitando el aumento de la temperatura de la superficie interior de la cubierta y el consumo energético de refrigeración (véase apartado 7.3.4).

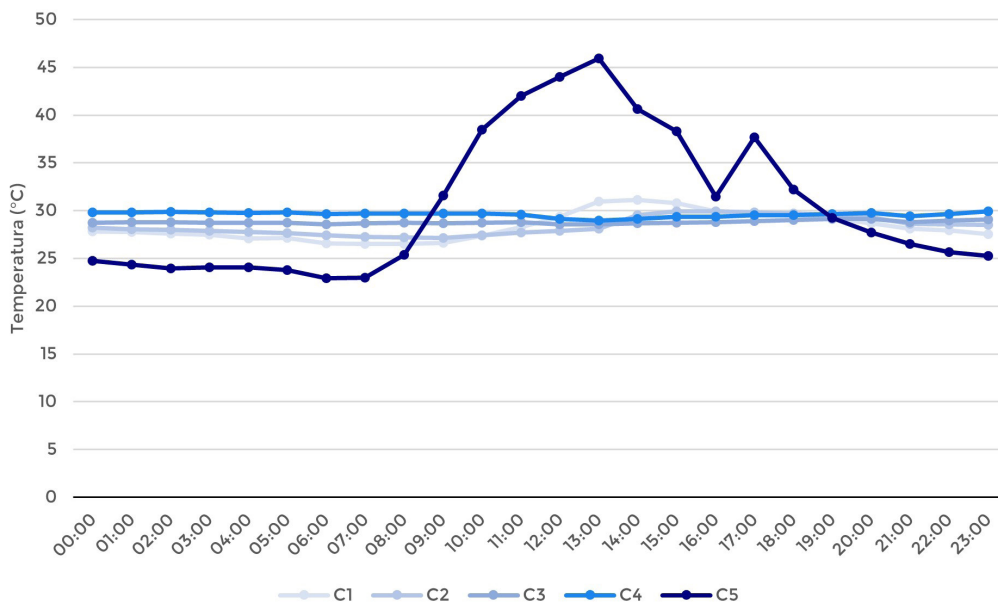


Figura 6.59. Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 12 de julio de 2021.

### 6.6.2.2 Análisis de un día frío: 18 de enero 2022

Para analizar el comportamiento en un día frío característico se estudian los modelos A, B y C el día 18 de enero de 2022. Se trata de un día con temperaturas del aire por debajo de 15 °C y por encima de los 0 °C, con poca variación térmica diaria. La temperatura máxima es de 13,78 °C, alcanzada a la 14:00 h, y la temperatura mínima es de 3,65 °C y se produce a las 08:00 h, coincidiendo con los primeros valores de radiación solar. Se trata, por lo tanto, de un día claro, sin nubosidad, con temperaturas bajas a lo largo de todo el día, pero con unos valores de radiación solar que llegan a alcanzar máximos de 531 W/m<sup>2</sup> una hora antes de la máxima temperatura, a las 13:00 h. Las bajas temperaturas van a favorecer un menor consumo de agua disponible en el sustrato para enfriar la superficie de este, pero los elevados valores de radiación solar que se producen en València, a lo largo de todo el año, van a provocar que el sustrato (oscuro) alcance temperaturas superiores a las gravas (claro), siendo la diferencia entre las temperaturas máximas de las diferentes maquetas más evidente que en épocas cálidas con elevada temperatura ambiente. Cabe destacar que a pesar de las diferencias en el perfil de temperaturas entre el día 12 de julio y 18 de enero, ambos días se ubican dentro de periodos secos, ya que en los 46 días previos al 18 de enero de 2022 tan solo se han producido 1,1 mm de lluvia, el día 11 de enero.

En la figura 6.60 se puede observar una mayor dispersión de los datos registrados, en los tres modelos de maqueta, respecto a los mismos gráficos obtenidos para un día cálido. Es decir, los datos obtenidos por las sondas se distribuyen en un rango de temperatura mayor. Esta dispersión se debe a las características del clima mediterráneo, con elevados valores de radiación solar durante todo el año, a pesar de la temperatura ambiente más baja (aunque habitualmente por encima de los 0 °C). La elevada radiación solar genera elevadas temperaturas en las capas superficiales de la cubierta, debido a los fenómenos de reflexión y absorción, mientras que la baja temperatura ambiente produce, especialmente en horas nocturnas sin radiación solar, temperaturas en las diferentes capas de la cubierta incluso por debajo de 0 °C (especialmente en las más expuestas, es decir, sobre el material aislante y/o el sustrato).

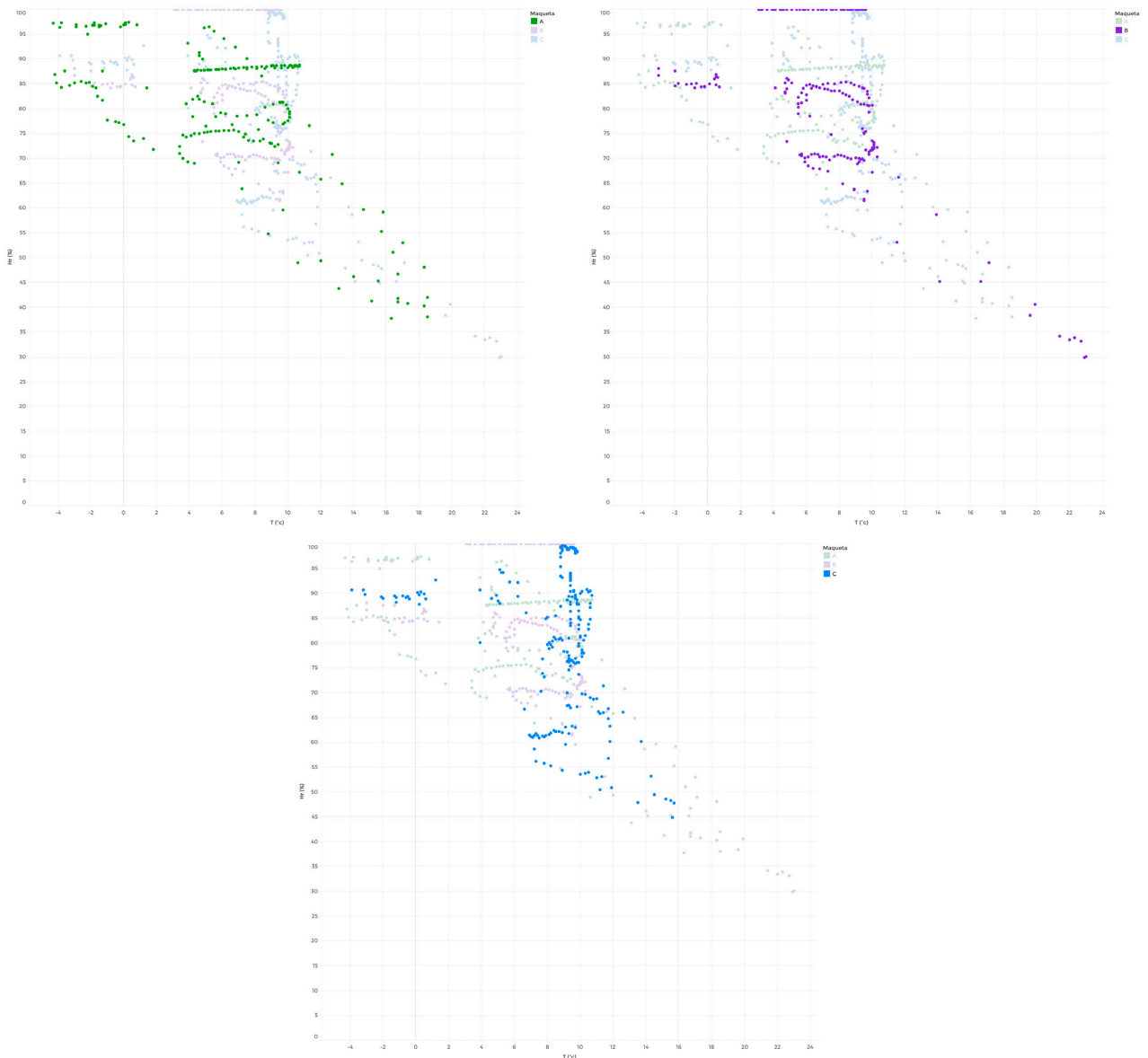


Figura 6.60. Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el día 18 de enero de 2022.

De nuevo, el modelo C presenta menor densidad de datos por debajo de los 2 °C y por encima de los 12 °C, con la mayoría de los datos agrupados entre los 6 °C y 12 °C (variación térmica de 6 °C). El modelo B presenta una densidad de datos por debajo de los 2 °C similar al modelo C, pero con datos que alcanzan temperaturas mucho mayores. En el modelo C ningún dato supera los 16 °C, mientras que en el modelo B se llegan a alcanzar los 22-24 °C. Aun así, la mayoría de los datos se agrupan entre 4 °C y 10 °C, con una variación térmica similar a la del modelo C. En el caso del modelo de cubierta sin ajardinar, modelo A, los datos a altas temperaturas alcanzan los 18-20 °C, pero este modelo tiene la mayor densidad de valores en temperaturas bajas. Los datos se encuentran más dispersos que en los modelos ajardinados, agrupándose la mayoría entre 3 y 11 °C (variación térmica de 8 °C).

Al igual que se ha apreciado en el estudio de la distribución de los datos por humedad relativa y temperatura por meses, los modelos B y C presentaban una franja de datos con diferentes temperaturas y una humedad relativa del 100 %. En el caso del modelo A, ningún dato alcanza una humedad relativa del 100 %, confirmando que en esta maqueta no hay ninguna capa cuya función explícita sea la de almacenamiento de agua (figura 6.61). Este factor justifica que se produzca una variación de humedad relativa a lo largo del día mucho mayor que en las capas de los modelos B y C. En el caso de las sondas A1 y A2 se reproducen los pa-



trones observados en el día cálido. En el caso de la A2, al disponerse bajo la capa de aislamiento térmico se produce menor evaporación del agua disponible en esta capa, además de la posible existencia de problemas de drenaje que producen valores entorno al 80 % de humedad relativa, y en la sonda A1 en torno al 90 % de humedad. En el modelo B, los datos con la máxima humedad relativa corresponden a la sonda B3 (figura 6.62), ubicado entre la capa drenante y el sustrato, las dos capas destinadas al almacenamiento de agua. Esta sonda se encuentra por encima de la capa de material aislante, y por debajo de 10 cm de sustrato. El poco espesor de sustrato aporta poca inercia, y, por lo tanto, poca protección térmica, hecho apreciable en la figura 6.60, donde los datos con una humedad relativa del 100 % se distribuyen entre los 3 °C y 10 °C. En cambio, en el modelo C, los datos que presentan una humedad del 100 % corresponden a la sonda C4 (figura 6.63), situado en medio de la capa de sustrato, bajo 30 cm de este. En este caso los 30 cm de sustrato aseguran una mayor protección térmica, hecho que explica que en la figura 6.60 estos valores con 100 % de humedad relativa se distribuyan entre los 9 °C y 10 °C. En las figuras 6.64, 6.65 y 6.66 se indican las temperaturas por modelo y sonda. En el caso de la sonda superficial C4, esta presenta una temperatura casi constante, en torno a los 10 °C, con una variación térmica diaria menor a 1 °C (0,95 °C). En cambio, la sonda B3 describe una trayectoria más amplia, con una variación térmica diaria de 4,4 °C.

En relación con los valores de humedad relativa del resto de las capas de las maquetas, se aprecia una menor variación en la humedad, en concreto una menor desecación en horas centrales del día, especialmente en las sondas B3 y C4 (con humedad relativa constante del 100 %), pero también en las sondas B2, C2 y C3. Las sondas B1 y C1, situadas bajo los cajones de maqueta, se encuentran más expuestas a las condiciones exteriores de temperatura y humedad, por lo que presentan un perfil muy similar de humedades relativas, al igual que pasaba en el día cálido característico. Esta menor variación de humedad diaria y desecación en la superficie se debe a la menor radiación solar y a la temperatura ambiente más baja. Aun así, como se ha comentado, la radiación solar en València presenta valores considerables durante todo el año, situándose el valor máximo este día 18 de enero por encima de los 500 W/m<sup>2</sup>. Ello supondrá una acumulación de calor en el sustrato (con bajo albedo) que deberá ser contrarrestado con la disipación de calor por evaporación. En este caso se observa como la sonda superficial del modelo C (C5) alcanza valores mínimos de humedad en torno al 48-50 %, superiores a los valores superficiales del modelo B (B4), con una caída hasta el 30 % de humedad relativa. En este caso, se ha producido una mayor evaporación en el modelo C, con más agua almacenada, gracias a los 60 cm de sustrato, la lámina absorbente y la capa drenante. Se puede apreciar como el pico de desecación de las sondas C2 y C3 es más pronunciado, cayendo entorno a un 15 %, que el de la sonda B2, con una variación menor al 5 %. La mayor caída de humedad de las sondas C2 y C3 implica más humedad empleada en la evaporación del sustrato y también utilizada por la propia vegetación.

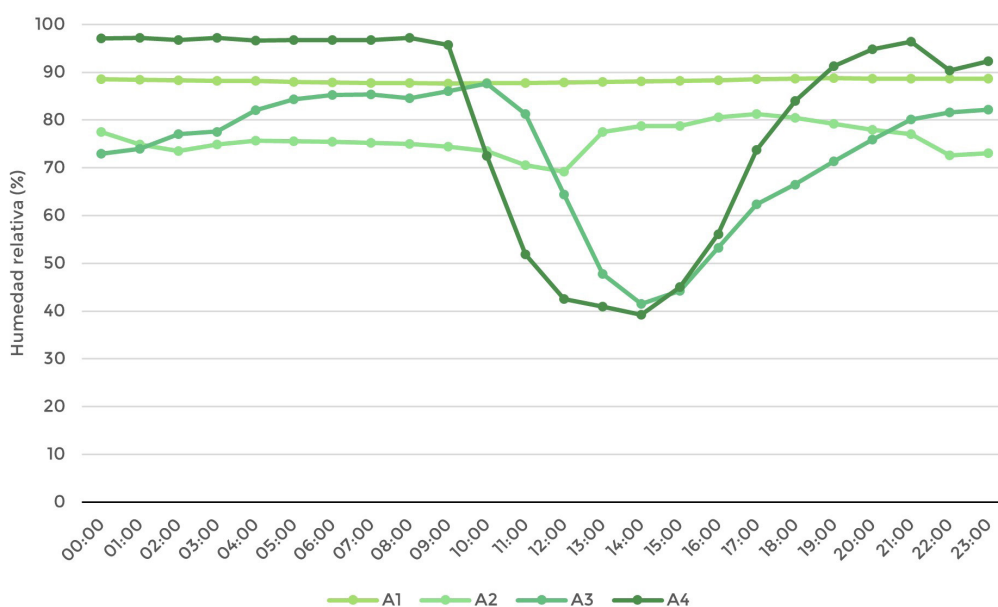


Figura 6.61. Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 18 de enero de 2022.



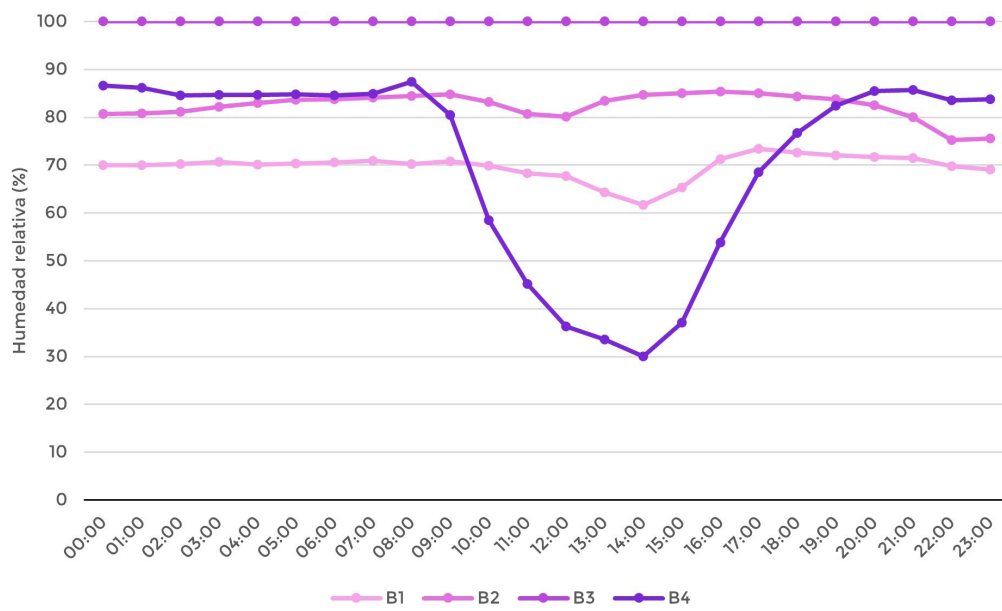


Figura 6.62. Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 18 de enero de 2022.

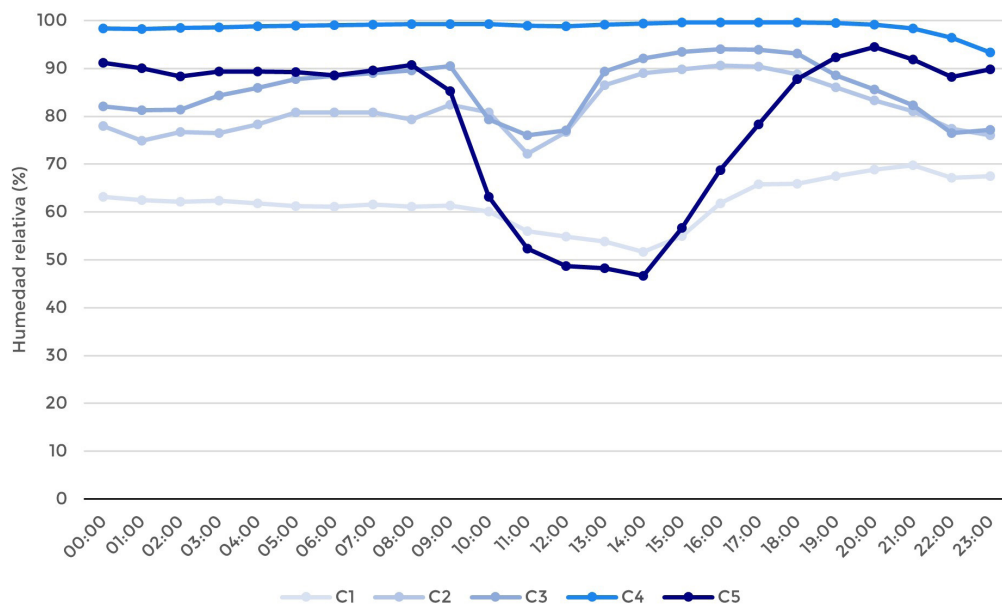


Figura 6.63. Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 18 de enero de 2022.

Como se puede indicar, las temperaturas superficiales son las que presentan mayor variación térmica diaria en los tres modelos. La sonda C5 de la maqueta de cubierta ajardinada intensiva (figura 6.69) es el que presenta una distribución de temperaturas diaria más parecida a la temperatura ambiente. La diferencia entre la máxima temperatura de la sonda C5 y la máxima temperatura ambiente es de 1,77 °C, produciéndose a la misma hora (14:00 h) y una hora después de la máxima radiación solar. Para la sonda A4 de la maqueta tradicional con acabado de grava (figura 6.67) la máxima temperatura es de 18,4 °C (4,62 °C más que la temperatura ambiente y 2,85 °C más que la sonda C5) a las 14:00 h. En el caso de la sonda B4 de la maqueta de cubierta ajardinada extensiva (figura 6.68), la máxima temperatura alcanzada es de 22,95 °C (9,17 °C más que la temperatura ambiente, 7,4 °C más que la sonda C5 y 4,55 °C más que la sonda A4), también a las 14:00 h.

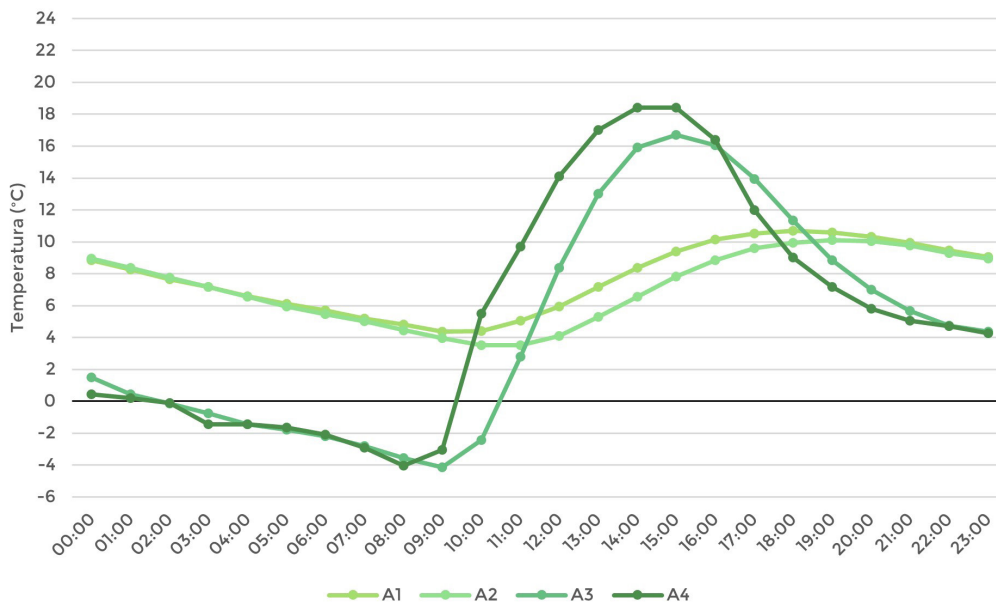


Figura 6.64. Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 18 de enero de 2022.

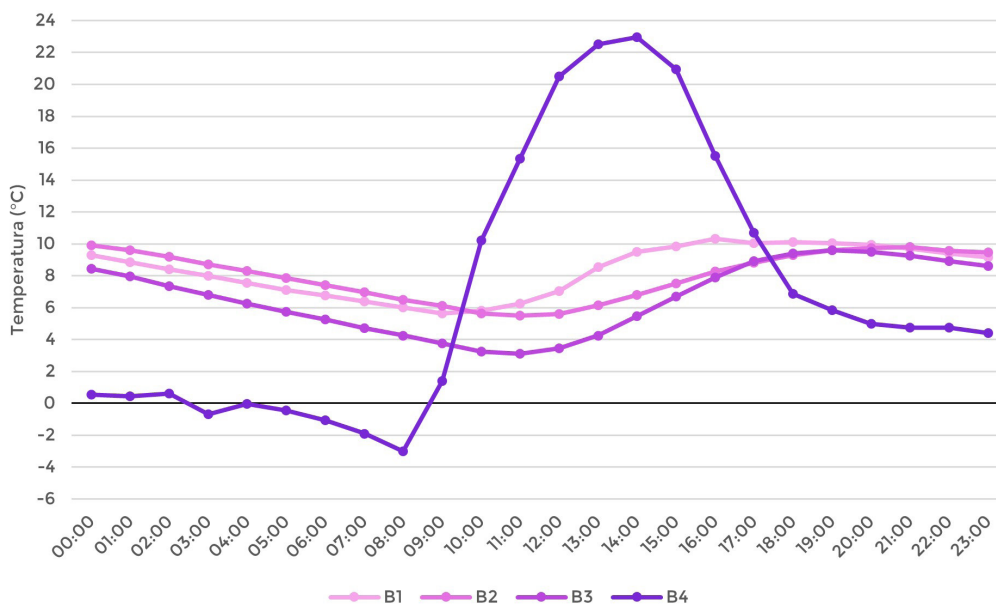


Figura 6.65. Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 18 de enero de 2022.

Con ello se concluye que, mientras en el día característico cálido, los modelos ajardinados con sustrato oscuro presentaban mayor temperatura superficial que el modelo con grava, pero con diferencias de menos de 3 °C, en el caso del día frío el modelo ajardinado intensivo presenta la menor temperatura superficial, y con mayores diferencias con respecto a los modelos A y B. En este caso, la vegetación tipo *sedum*, tras el paso de todos los meses de más calor y con pocas precipitaciones, presenta una mortalidad que reduce su poder de cubrición del sustrato (véase apartado 6.5). Por lo tanto, el sustrato, más expuesto, absorbe mayor radiación solar, aumentando su temperatura. Esto, sumado a la limitada capacidad de almacenamiento de agua y a las pocas lluvias en días previos, fomenta una escasa evaporación del sustrato (menor que en el caso del modelo C), alcanzando las mayores temperaturas superficiales de los tres modelos. En el caso del modelo A, las gravas de color claro con mayor albedo absorben menor cantidad de radiación solar y acumulan menos calor, alcanzando temperaturas superficiales por debajo del modelo B. Por último, el modelo C presenta una mortalidad de parte de su vegetación, pero algunos de los arbustos, con mayor LAI y altura que la vegetación suculenta, han sobrevivido y protegen el sustrato. Esta protección durante las horas de sol asegura sombra sobre el sustrato y esto, junto a la mayor evaporación, permite alcanzar menores tem-



peraturas máximas superficiales (y más similares a la temperatura ambiente). Durante las horas nocturnas la capa de vegetación también funciona como capa aislante, consiguiendo temperaturas mínimas mayores que las del modelo A, completamente expuesto (-3,55 °C en la sonda C5 y -4,05 °C en la sonda A4).

En conclusión, la escasez de agua y las temperaturas superficiales más elevadas del modelo B implican unas ganancias de calor por la cubierta que deben estudiarse conjuntamente con las ganancias aportadas por el resto de la envolvente para conocer su beneficio en la reducción del consumo energético de calefacción. En parte esto se debe a que el clima mediterráneo presenta inviernos secos, con pocas precipitaciones, y con temperaturas que no son especialmente bajas. Estas ganancias, por lo tanto, pueden ser positivas. Aun así, por motivos de supervivencia de la vegetación sería necesario plantear de nuevo un equilibrio sostenible entre un mínimo aporte de agua por riego y la escasez hídrica.

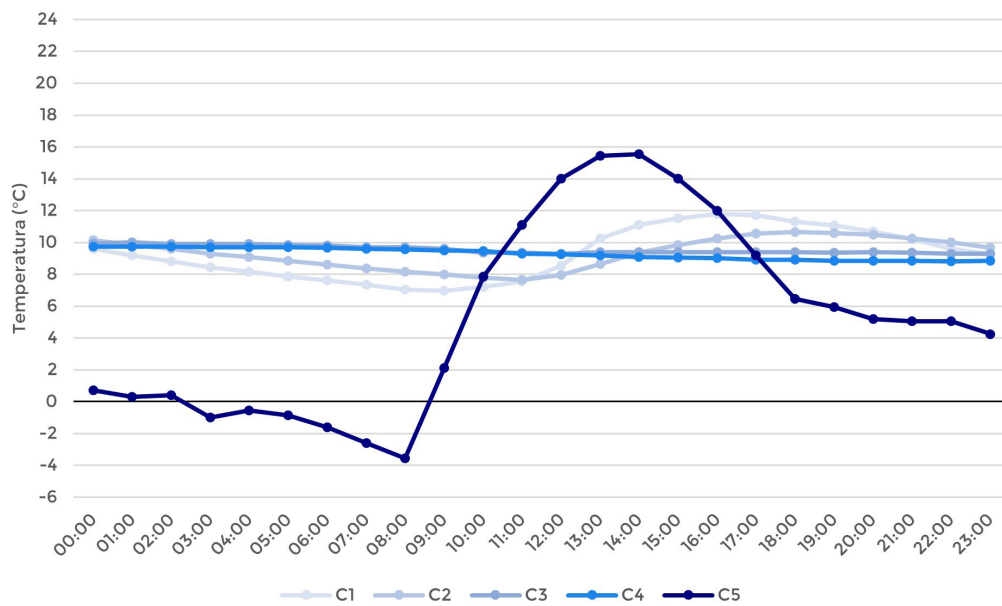


Figura 6.66. Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 18 de enero de 2022.

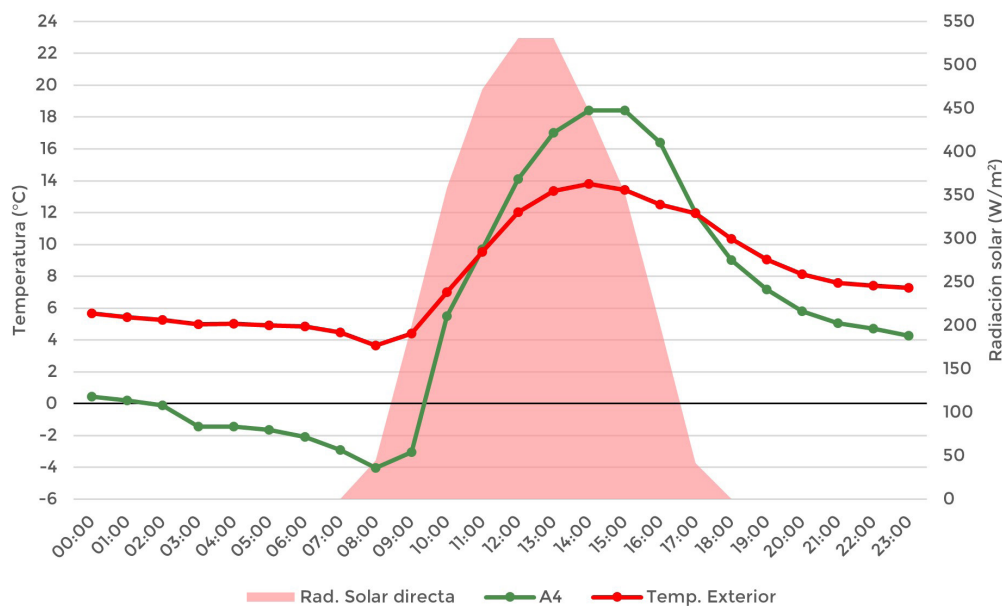


Figura 6.67. Temperatura (°C) superficial de la maqueta A, temperatura ambiente y radiación solar para el día 18 de enero de 2022.

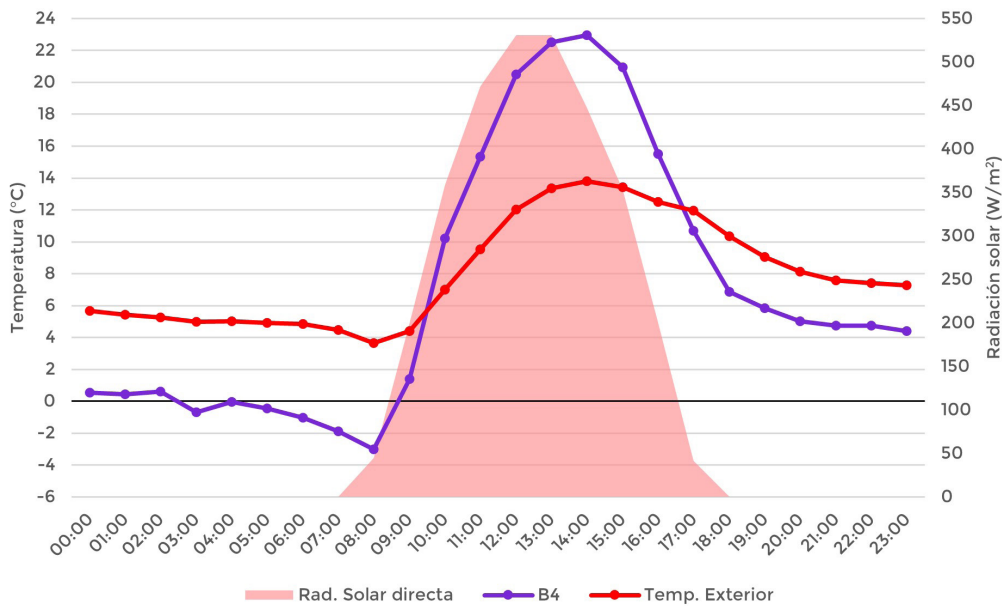


Figura 6.68. Temperatura (°C) superficial de la maqueta B, temperatura ambiente y radiación solar para el día 18 de enero de 2022.

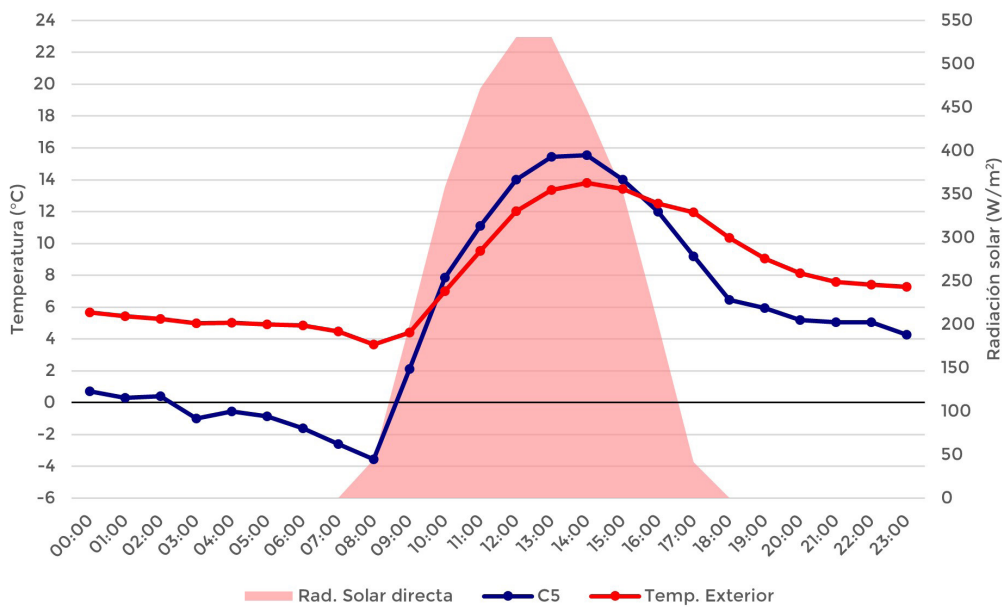


Figura 6.69. Temperatura (°C) superficial de la maqueta C, temperatura ambiente y radiación solar para el día 18 de enero de 2022.

### 6.6.2.3 Análisis de los contenidos de humedad relativa antes y después de un periodo de lluvias

En los dos casos anteriores, tanto el día cálido como el frío característicos se sitúan dentro de un periodo de sequía, propio del clima mediterráneo de la ciudad de València. Para profundizar un poco más, con los datos que se disponen, en la influencia de la disponibilidad de agua en el funcionamiento del mecanismo de evapotranspiración en cubiertas ajardinadas autosuficientes, se han estudiado los días previos y posteriores a un periodo de lluvias. Se analiza desde el día 20 hasta el 29 de enero de 2022 (figura 6.70). Durante los días 23, 24 y 25 se produjeron, respectivamente, precipitaciones diarias de 0,6, 1,5 y 6,2 mm. Los días previos, del 20 al 22 de enero, responden a un periodo con escasas lluvias, ya que las últimas precipitaciones registradas son del 11 de enero, con tan solo 1,1 mm.



De acuerdo con Zheng *et al.*<sup>130</sup> al quinto día después de un evento lluvioso el sustrato de una cubierta ajardinada autosuficiente alcanza valores de almacenamiento de humedad menores al 5 %, momento en el cual el aporte de la evaporación del sustrato a las pérdidas de calor por evapotranspiración de la cubierta es mínimo. El día 20 de enero ya se sitúa 9 días después de las últimas lluvias, que además fueron escasas. De acuerdo con los datos aportados por Zheng *et al.*<sup>131</sup> las cubiertas ajardinadas con disponibilidad de agua y una vegetación bien desarrollada pueden llegar a reducir los flujos de calor a través suyo en un 81 % respecto a una cubierta tradicional sin ajardinada. Este valor, en cambio, va reduciéndose paulatinamente con la disminución del agua disponible en las capas de la cubierta autosuficiente hasta que la humedad del sustrato llega a valores mínimos del 5 % en torno a 5 días después del evento lluvioso. En ese momento, sumando el aumento de la mortalidad de la vegetación, las cubiertas ajardinadas reducen los flujos de calor hasta un 40 %. El estudio de los tres días posteriores al periodo de lluvias muestra esta pérdida paulatina de la humedad y, por lo tanto, el aumento de la temperatura superficial de las cubiertas ajardinadas y la limitada reducción de los flujos de calor a través de ellas.

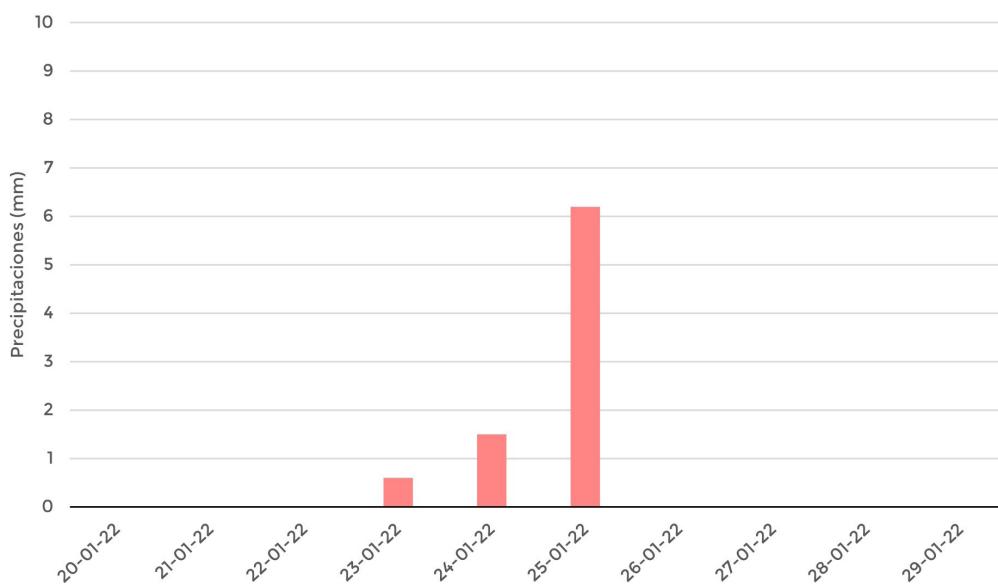


Figura 6.70. Precipitaciones totales diarias (mm) del 20 al 29 de enero de 2022.

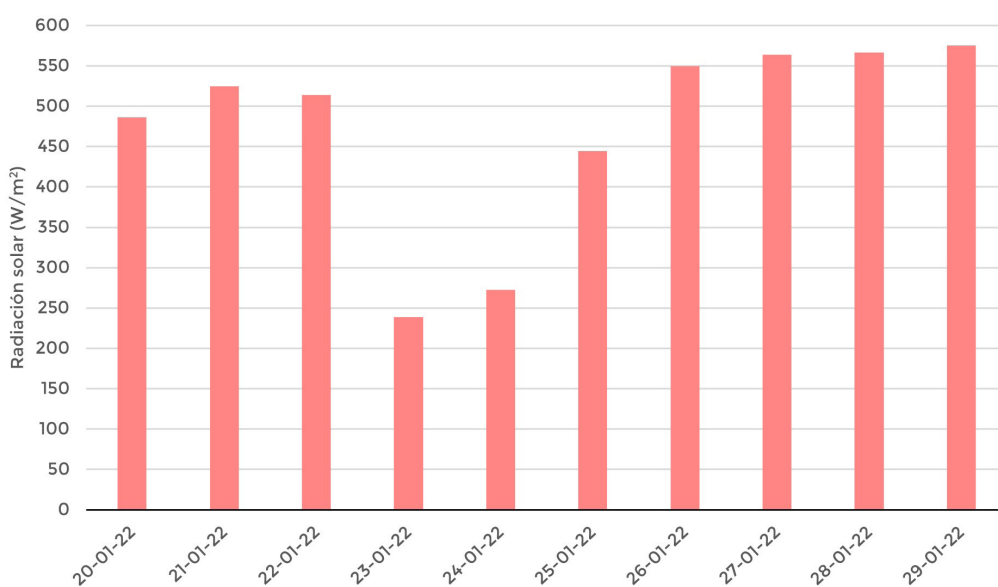


Figura 6.71. Radiación solar máxima diaria (W/m²) del 20 al 29 de enero de 2022.

130 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.

131 *Ibíd.*



En la figura 6.74 se pueden observar los datos de humedad relativa por sonda en cada uno de los días del periodo estudiado para el modelo de cubierta con acabado de grava (modelo A). En las sondas A1 y A2 se detecta una acumulación de agua debido a posibles problemas de filtraciones y/o mal drenaje, por lo que en los días posteriores a las precipitaciones los valores de humedad son mayores incluso que en los días 23 a 25, en los cuales se producen las lluvias. En cambio, las sondas menos protegidas, ubicadas por encima de la capa de aislamiento térmico, presentan un comportamiento diferente. La sonda A3 pierde rápidamente la humedad, de manera paulatina, desde el día 26 hasta el 29.

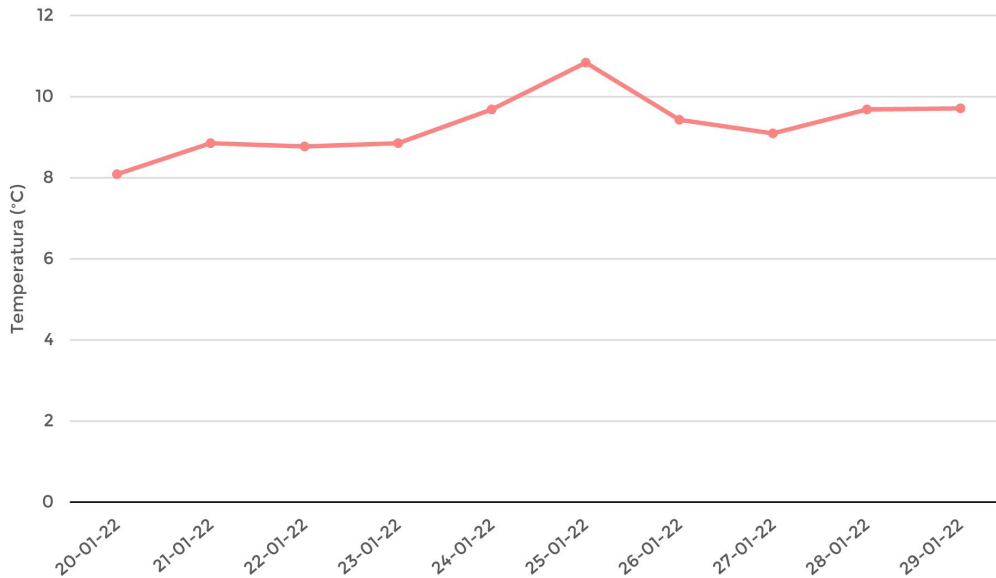


Figura 6.72. Temperatura media diaria (°C) del 20 al 29 de enero de 2022.

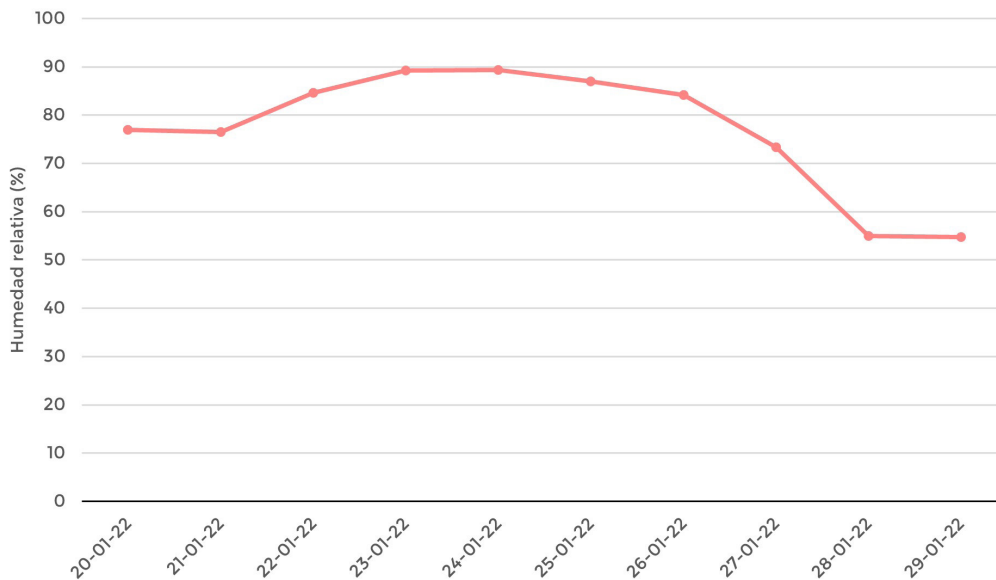


Figura 6.73. Humedad relativa media diaria (%) del 20 al 29 de enero de 2022.

Cabe destacar que los días posteriores a las precipitaciones presentan valores de radiación solar máxima (figura 6.71) y temperatura ambiente media diaria (figura 6.72) más elevados que en el periodo del 20 al 22 de enero, previo a las lluvias. Del 26 al 29 de enero se alcanzan valores de radiación solar máxima iguales o mayores a 550 W/m<sup>2</sup>, mientras que los días 20, 21 y 22 se alcanza un valor máximo de 486 W/m<sup>2</sup>, 525 W/m<sup>2</sup> y 514 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. En relación con la temperatura media diaria, los días del 26 al 29 de enero esta se sitúa por encima de 9 °C, siendo en torno a 1 °C mayor que en los días previos a las precipitaciones. Esta mayor temperatura ambiente y radiación solar producen una rápida desecación de la sonda A3, e incluso de la A4. En el caso de esta sonda, debido a la elevada humedad ambiente registrada en estos días (figura



## 6. Monitorización con sensores en modelos a escala



Figura 6.74. Diagrama de puntos con datos de humedad relativa (%) por sonda de la maqueta A del 20 al 29 de enero de 2022.



6.73), especialmente hasta el día 25, la humedad relativa de la superficie de las gravas se encuentra entre el 100 % y el 45-55 % en los días previos a las lluvias. En cambio, después de las precipitaciones la superficie se va desecando, alcanzando límites inferiores del 30 y 35 %. Esta rápida desecación en las capas superiores ejemplifica que el modelo A con acabado de grava no dispone de ninguna capa para retención y almacenamiento del agua tras las lluvias.

En el caso de la cubierta ajardinada extensiva, modelo B (figura 6.76), se puede observar un comportamiento diferente al del modelo A. En este caso, la sonda B1, por debajo del cajón de maqueta, experimenta una rápida bajada de la humedad relativa tras el periodo de lluvias, mostrando un perfil similar a la humedad exterior. En cambio, este modelo dispone de capas de almacenamiento de agua. La sonda B2 presenta valores más elevados de humedad, y menor desecación en los días posteriores a las lluvias, así como la sonda B3 que presenta una humedad constante del 100 % al ubicarse entre la capa drenante y el sustrato (acumuladoras de humedad). En el caso de la sonda B4 sí que se puede apreciar que esta mayor disponibilidad de agua se traduce en valores máximos de humedad relativa más elevados en los días 26 a 29 de enero, por encima del 92 %, mientras que se produce menor desecación. Estos días presentan una radiación solar y una temperatura ambiente mayor a los días previos a las precipitaciones, pero aun así presentan menor desecación. Es decir, se han detectado mayores valores de humedad, estando el mínimo por encima del 65 %, mientras que en los días del 20 al 22 la mínima humedad relativa de la sonda B4 se sitúa entre el 35-40 %. Además, la radiación solar y la temperatura ambiente en los días 26 a 29 son muy similares entre ellos, pero a pesar de ello la superficie del sustrato del modelo B experimenta mayores valores de humedad, es decir, evapora más el día 26, disminuyendo, de acuerdo con los gráficos, tanto la máxima humedad relativa registrada como, sobre todo, la mínima. Este modelo de cubierta extensiva no es capaz de almacenar gran cantidad de agua, por lo que ya en los días 27 a 29 de enero la desecación de la superficie es mayor, alcanzando valores mínimos en torno al 50 % de humedad relativa. Por lo tanto, la evaporación del sustrato se ha reducido sobre todo entre el primer y segundo día posterior a las lluvias.

Respecto a las temperaturas detectadas por las sondas en el día 26 de enero (figura 6.77), en la sonda B4, de la superficie de la cubierta, la temperatura máxima alcanzada y la variación térmica diaria son menores que en los días 20 a 22. Se produce una diferencia entre temperaturas superficiales máximas de aproximadamente 2 °C, a pesar de que en el día 26 la temperatura ambiental media diaria es aproximadamente 1 °C superior a las temperaturas de los días 20 a 22 de enero y la radiación solar máxima es también ligeramente mayor. Incluso la superficie de la cubierta consigue mantenerse durante todo el día por encima de los 3 °C, hecho que no se consigue en el resto de los días (a excepción de los días en los que se producen precipitaciones). El día 27 presenta valores de temperatura superficial del sustrato similares a los días previos a las precipitaciones, a pesar de la mayor temperatura ambiente y radiación solar. Se puede apreciar de nuevo como la poca capacidad de almacenamiento de agua en este tipo de cubierta ajardinada extensiva genera la principal reducción de la evaporación del sustrato entre el primer (26 de enero) y segundo (27 de enero) día posterior a las lluvias.

Se puede advertir en las sondas B3 y B4 una menor densidad de puntos el día 28 de enero, y ningún dato registrado el 29 de enero. Esto se debe a un fallo en el funcionamiento de estas dos sondas a partir de las 09:00 h del día 28 de enero. Aun así, se detecta que la principal reducción en la evaporación del sustrato se produce entre el primer y segundo día después del evento lluvioso.

El comportamiento de la cubierta C, ajardinada intensiva, confirma los resultados observados en la cubierta ajardinada extensiva (B). La sonda C1, más expuesta, presenta un perfil similar al descrito por la sonda B1 y la humedad exterior, mientras que las sondas C2, C3 y C4 registran entre los días 26 y 29 de enero mayores valores de humedad que en los días previos a las precipitaciones (Figura 6.78). La sonda C4, ubicada en una posición intermedia del sustrato, desde el día 20 de enero hasta el 22 muestra datos de humedad relativa por debajo del 100 %. Incluso el día 22 de enero, 11 días después de las últimas lluvias, la sonda C4 no registra ningún dato con una humedad del 100 %, ubicándose entre el 99 % y el 92 %. En los días con precipitaciones (23 a 25 de enero) aumenta paulatinamente la humedad registrada, hasta alcanzar el día 25 una humedad del 100 % en todos los registros, valor que se mantiene en los días posteriores.





## 6. Monitorización con sensores en modelos a escala

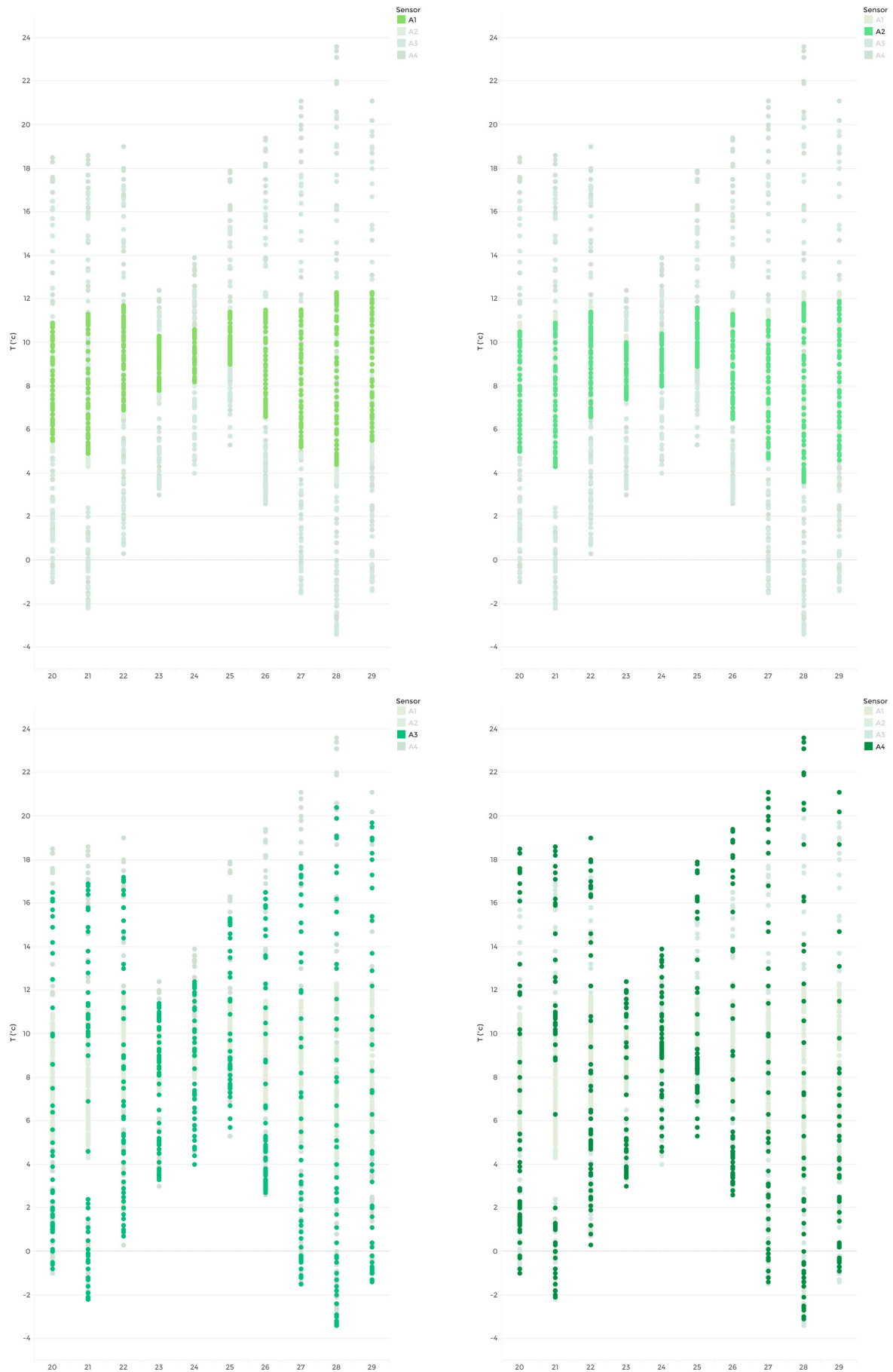


Figura 6.75. Diagrama de puntos con datos de temperatura (°C) por sonda de la maqueta A del 20 al 29 de enero de 2022.



Figura 6.76. Diagrama de puntos con datos de humedad relativa (%) por sonda de la maqueta B del 20 al 29 de enero de 2022.

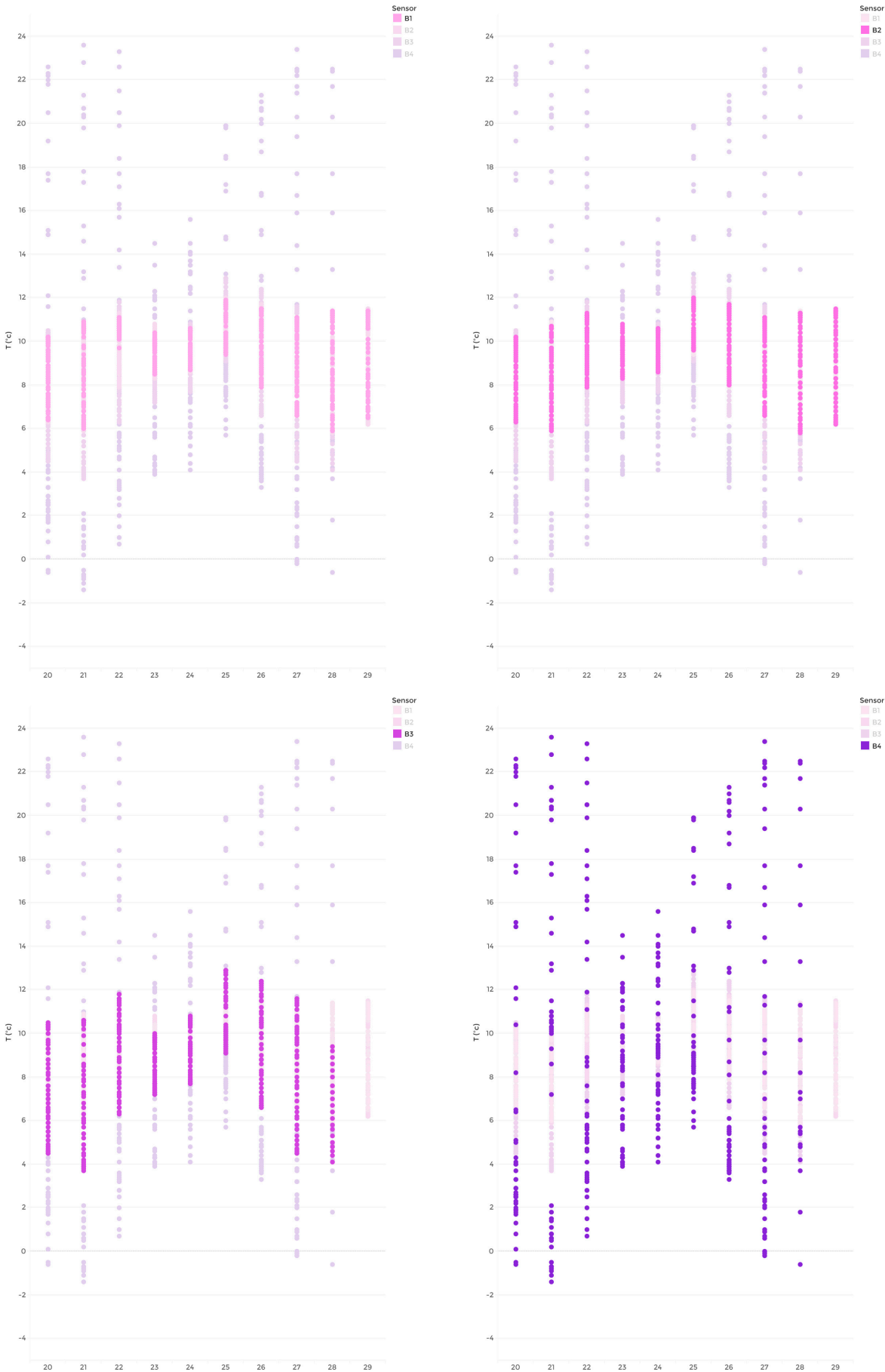


Figura 6.77. Diagrama de puntos con datos de temperatura (°C) por sonda de la maqueta B del 20 al 29 de enero de 2022.

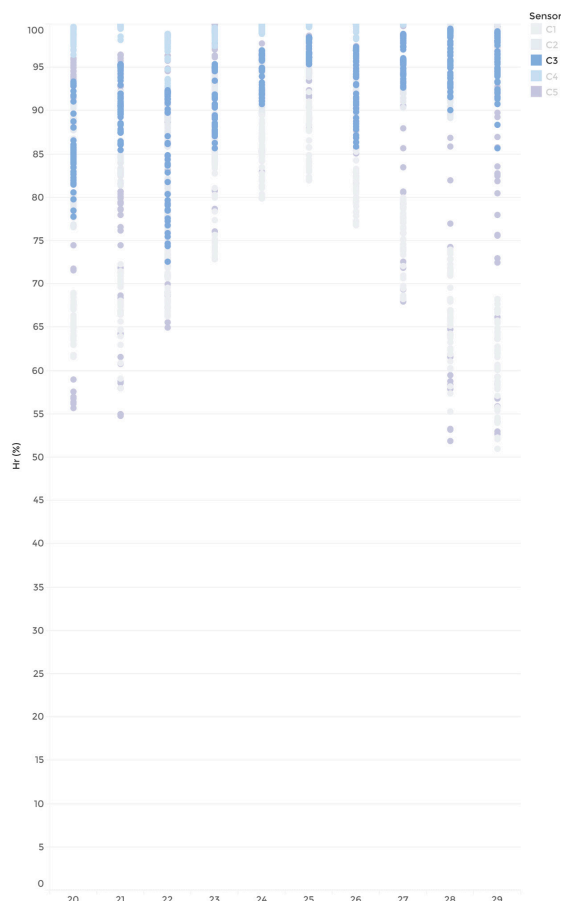


En la superficie del sustrato (sonda C5) se detectan en todos los días posteriores a las precipitaciones valores mayores de humedad relativa, alcanzado el 100 %, mientras que en los días previos a las precipitaciones el registro máximo de humedad relativa quedaba entorno al 95-96 %. Se puede observar cómo poco a poco, con el paso de los días, la superficie del sustrato se deseca más, con valores mínimos de humedad relativa más bajos. Esto concuerda con los valores crecientes de humedad, entre los días 26 y 29, en las sondas C2 y C3. Mayor humedad en estas sondas, así como mayor variación diaria de humedad (valores más altos, pero también más bajos) responden a una mayor evaporación del agua disponible en estas capas de la cubierta ajardinada, humedad que es empleada por el sustrato para enfriar la superficie. La temperatura ambiente y, sobre todo, la radiación solar aumentan desde el día 26 y 27 hasta el día 29, por lo que el sustrato absorbe más, aumenta su temperatura y requiere del agua almacenada en las capas inferiores (situación de las sondas C2 y C3) para aumentar la evaporación del sustrato y conseguir en la superficie menores valores de temperatura que en los días previos a las lluvias.

En relación con las temperaturas registradas (Figura 6.79), las sondas C2, C3 y C4 presentan mayores temperaturas después de las precipitaciones que en los días 20 a 22 de enero. La máxima temperatura en las sondas C3 y C4, bajo y dentro del sustrato respectivamente, se produce el día 26, justo después de las precipitaciones. Un comportamiento similar, pero no tan evidente, se detecta también en la sonda B3 (bajo la capa de 10 cm de sustrato). Este comportamiento se justifica de acuerdo con los mayores valores de humedad registrados en el sustrato (sondas C3 y C4 en la cubierta ajardinada intensiva y B3 en la extensiva). La conductividad térmica del sustrato varía en función de la cantidad de humedad almacenada en su interior, aumentando la conductividad a mayor porcentaje de agua almacenada. El día 26, tras tres días de precipitaciones, el agua disponible en el sustrato y en la capa drenante, justo debajo de él, es elevada, asegurando mayores pérdidas de calor por evaporación del sustrato, menores temperaturas superficiales, pero también aumentando la conductividad térmica del sustrato.

La temperatura máxima registrada en la sonda C5 el día 26 es similar a la del día 22 gracias a la evaporación del sustrato. En cambio, las temperaturas máximas registradas el día 26 en las sondas C3 y C4 son, aproximadamente, 1 °C mayores que el día 22. Esto se debe a que el aumento de la humedad en el sustrato aumenta su conductividad térmica, transmitiendo más calor a las capas interiores de la cubierta. De hecho, a pesar de que la temperatura superficial exterior (sonda C5) va aumentando en los días posteriores a las precipitaciones, la temperatura en las sondas interiores (C3 y C4) va disminuyendo, al igual que la humedad detectada. Se confirma así la necesidad de instalar una mínima capa de material aislante que asegure el correcto funcionamiento térmico de la cubierta, especialmente en periodos en los que el sustrato pueda almacenar grandes cantidades de agua.

La sonda C2, bajo una capa de 4 cm de material aislante, presenta mayor estabilidad de temperatura en los días posteriores a las precipitaciones. Las mayores temperaturas superficiales exteriores y la mayor transmisión de calor a capas interiores debido al sustrato húmedo producen un aumento de las temperaturas, pero la diferencia entre la máxima temperatura registrada los días 22 y 26 es de 0,25 °C, aproximadamente. Un comportamiento similar se detecta en la sonda B2, bajo 5 cm de material aislante.





## 6. Monitorización con sensores en modelos a escala

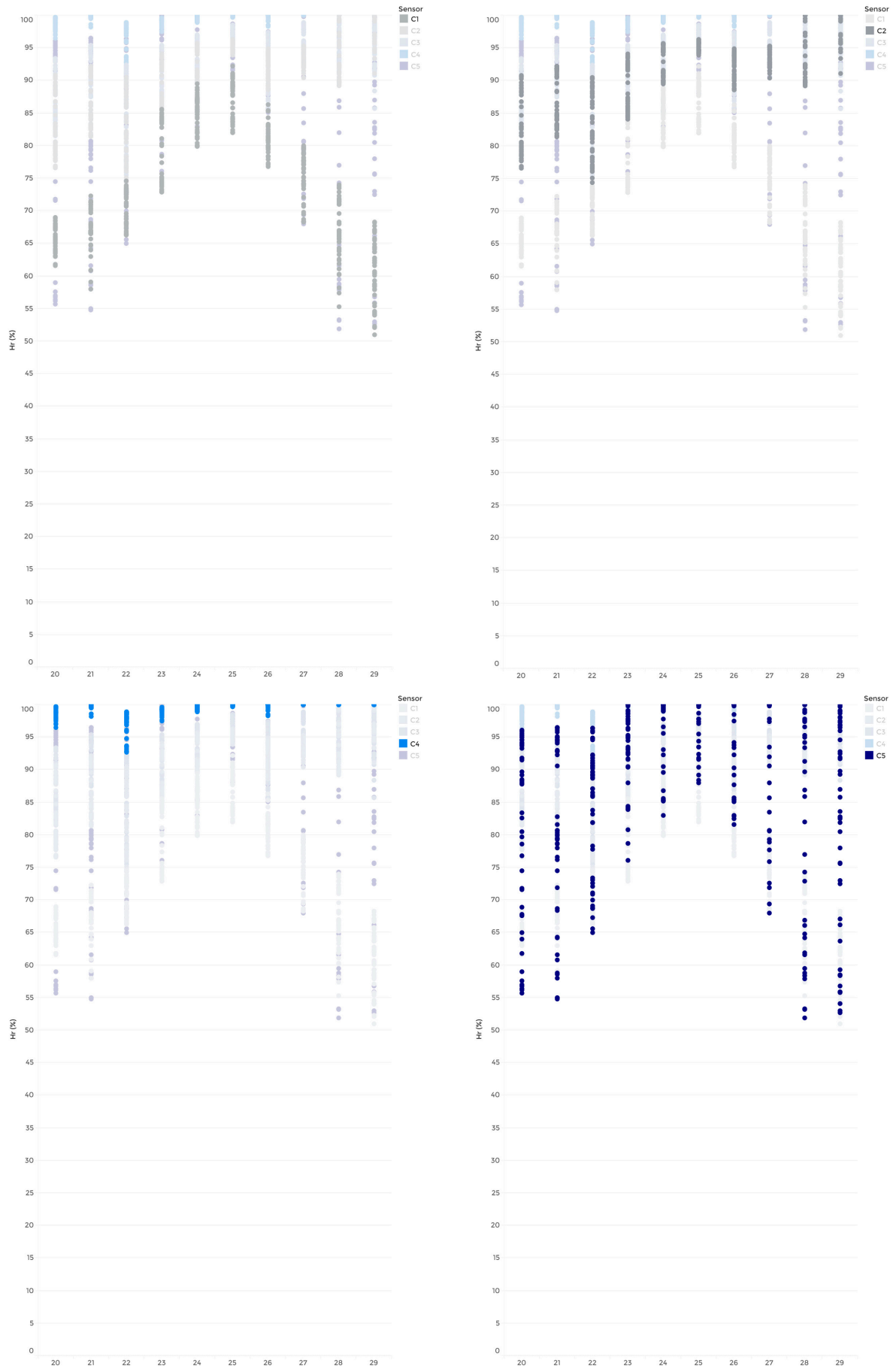


Figura 6.78. Diagrama de puntos con datos de humedad relativa (%) por sonda de la maqueta C del 20 al 29 de enero de 2022.

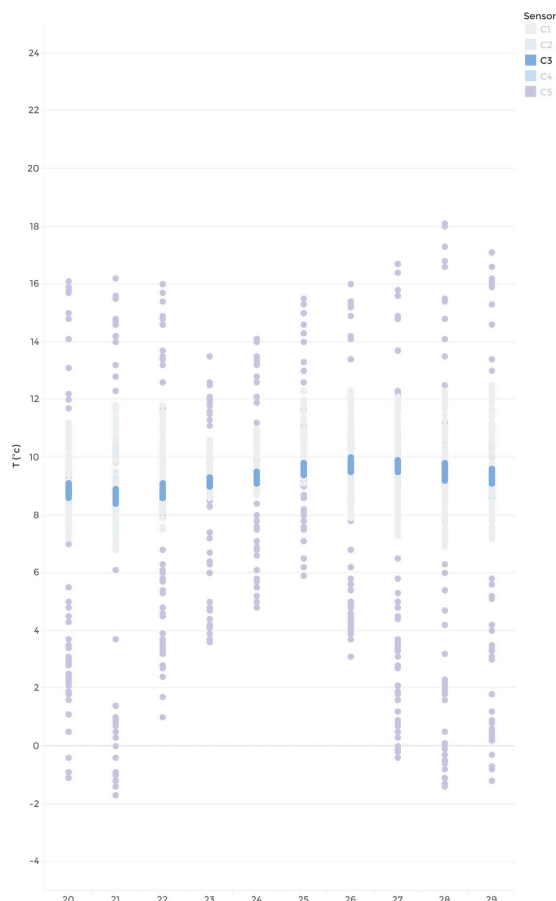


El día 29 de enero, a pesar de registrarse la mayor temperatura ambiente y radiación solar de todo el periodo (aunque son valores muy cercanos a los del día 28) la superficie del sustrato se ha desecado menos, es decir, ha alcanzado un valor mínimo de humedad relativa por encima del valor registrado el día 28. Por lo tanto, se ha producido una mayor evaporación del sustrato, fomentada por las mayores temperaturas y radiación solar. Si se analizan las temperaturas superficiales el máximo valor registrado el día 29 queda por debajo de la máxima del día 28, presentando también menor variación térmica diaria. La mayor evaporación del sustrato ha asegurado una menor temperatura superficial.

Este comportamiento se desvía de lo esperado, ya que se observa que la evaporación del sustrato se reduce principalmente tras el segundo día posterior a las lluvias (un día después que en el modelo B, ajardinado extensivo). Pero en la sonda C2 se detecta un aumento de la humedad máxima, en un 5 %, entre los valores de los días 26 y 27 de enero y los valores del 28 y 29 de enero, es decir, se produce un aumento de la humedad relativa registrada tras el segundo día posterior a las precipitaciones. Estos valores pueden explicarse debido a que el agua que se queda por encima de la lámina impermeable, no accesible para las raíces de la vegetación, tarda más en evaporarse y emplearse para refrigerar la superficie de la cubierta (además de que se encuentra por debajo del material aislante, térmicamente más protegida). Un aumento de la humedad indica un aumento de la evaporación en estas capas interiores de la cubierta conforme se va agotando el agua almacenada en capas más accesibles, como el sustrato o la capa drenante. Esta humedad se empleará por las capas superiores (el sustrato) para disipar el calor almacenado.

La mayor capacidad de almacenamiento de la cubierta ajardinada intensiva (modelo C), así como la mayor densidad de la vegetación arbustiva instalada implican mayores pérdidas de calor por evaporación tras un periodo de lluvias, especialmente mientras la humedad del sustrato se mantenga por encima del 5 %<sup>132</sup>. Esto asegura menores temperaturas superficiales.

La vegetación suculenta de la cubierta ajardinada extensiva (modelo B) presenta una mayor supervivencia, y especialmente, la capacidad de revivir y reflorece tras un periodo de sequía, pero en un momento de baja disponibilidad de agua, como es enero de 2022, la vegetación a parado su crecimiento o se ha secado, por lo que su poder de cubrición es menor. Esto, sumado a la menor capacidad de almacenamiento de agua y a la menor evaporación del sustrato, aseguran temperaturas superiores en la superficie del modelo B, con temperaturas máximas mayores de 21 °C entre los días 26 y 29 de enero, mientras que el modelo C presenta temperaturas superficiales máximas no superiores a los 18 °C. Por lo tanto, se observa un mejor comportamiento tras un periodo de lluvias del modelo C: las pérdidas de calor por evaporación se reducen a partir del segundo día posterior a las lluvias, pero incluso al cuarto día sigue funcionando bien este mecanismo al emplearse agua ubicada en capas interiores de la cubierta. En cambio, en el modelo B, la caída de la evaporación es más significativa y se produce tras el primer día posterior a las lluvias. En climas cálidos y secos, considerando además un limitado riego, más enfocado a la supervivencia de la vegetación, el modelo C no presenta grandes ventajas y variaciones en su comportamiento térmico respecto al modelo B.



132 Berretta, C., Poë, S., Stovin, V. 2014; Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., et al. 2022.

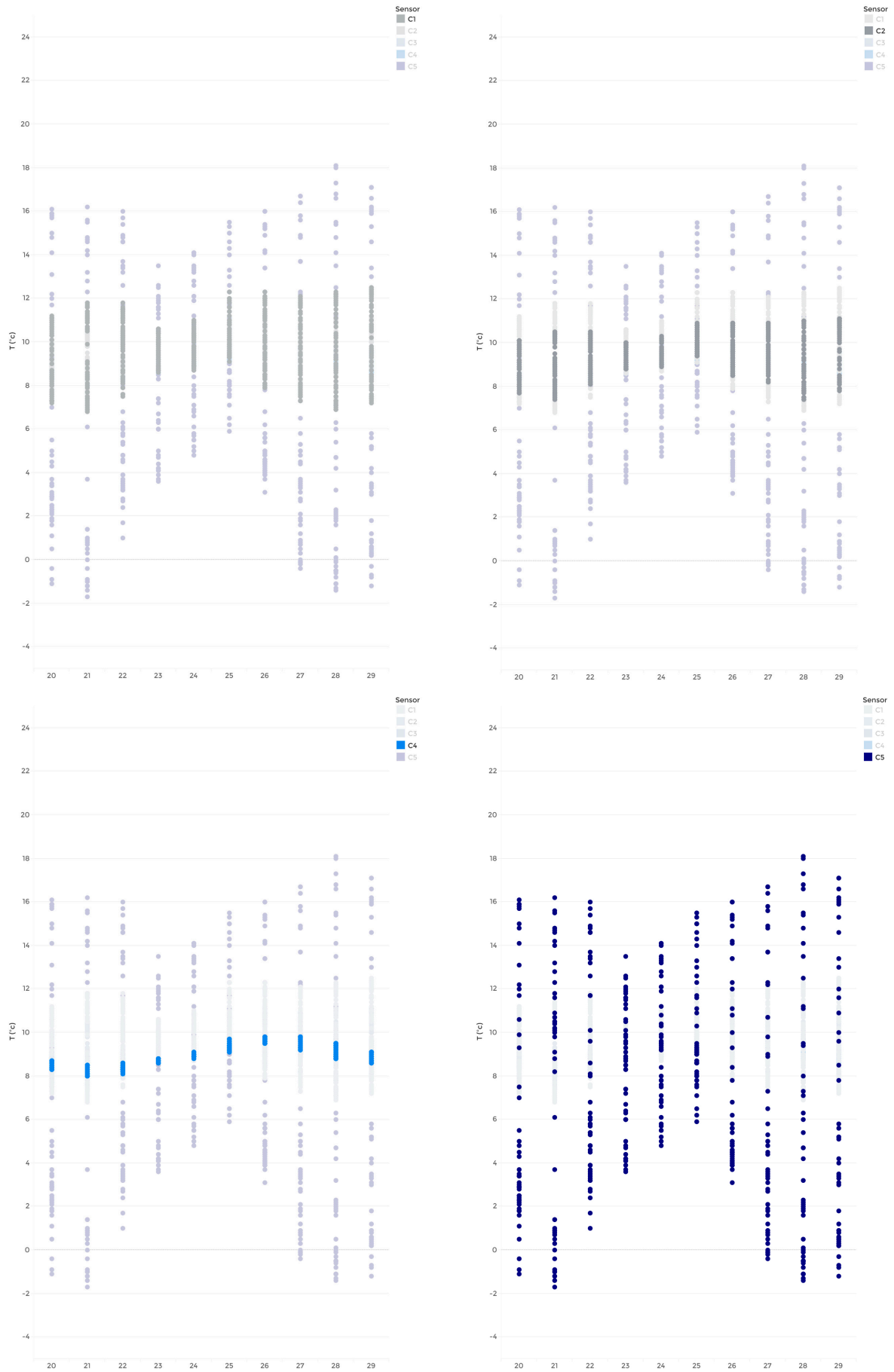


Figura 6.79. Diagrama de puntos con datos de temperatura (°C) por sonda de la maqueta C del 20 al 29 de enero de 2022.



### 6.6.3 Consideraciones finales

Los datos presentados permiten concluir que la capacidad de almacenamiento de agua y el uso que de ella se haga es determinante en el comportamiento de los sistemas constructivos de cubierta. Las cubiertas ajardinadas emplean la humedad disponible en las diferentes capas de la cubierta para la evapotranspiración (evaporación del sustrato y evaporación y transpiración de la capa de vegetación) y el desarrollo y crecimiento de la propia vegetación.

El modelo A, cubierta tradicional con acabado de grava, no dispone de capas cuya función sea la de almacenar agua, mientras que la humedad que pueda haber disponible no se emplea, en este caso, para reducir la temperatura superficial y los flujos de calor a través de esta cubierta. Eso sí, la elección de un acabado de gravas de color claro, con un mayor albedo y menor absorción de radiación solar permite reducir las temperaturas superficiales.

En el caso de los modelos ajardinados, tanto extensivo (modelo B) como intensivo (modelo C), el agua disponible se emplea para conseguir pérdidas de calor por evapotranspiración y la supervivencia de la vegetación. El hecho de emplear cubiertas autosuficientes que no disponen de sistema de riego y reducen el consumo de agua, conlleva, en un clima cálido y con escasas precipitaciones como el mediterráneo, poca disponibilidad de agua. Ambos modelos presentan una evaporación del sustrato limitada, mayor en el modelo C con mayor capacidad de almacenamiento de agua, pero que debe estudiarse en combinación con el estado de la vegetación que también sufre los periodos de estrés hídrico derivado de la escasez de precipitaciones. Por lo tanto, ambos modelos ajardinados B y C presentan un comportamiento energético y térmico análogo, y similar al modelo A. En este caso, cabe destacar el diferente albedo y absorción de radiación solar (que fomenta el incremento de temperatura superficial), por lo que una cubierta tradicional sin ajardinar con un acabado con menor albedo (como una lámina impermeable EPDM o LBM autoprotégida) tendría un comportamiento térmico peor que los modelos ajardinados. Además, los beneficios sociales y ambientales deben considerarse también a la hora de comparar los diferentes sistemas, determinando la sostenibilidad de cada una de las soluciones constructivas más allá del comportamiento térmico.

Si se busca el equilibrio entre el consumo mínimo de agua y los beneficios de las cubiertas ajardinadas, se plantea como necesario un aporte de agua de riego, especialmente para el desarrollo de la vegetación. Pero siempre debería ser mínimo, ya que es necesario encontrar un equilibrio entre el funcionamiento de la cubierta ajardinada y la escasez de agua a la que se enfrenta parte de nuestro territorio. Así, el modelo B, por su coste de construcción, peso propio, comportamiento térmico y las características de su vegetación, se presenta como el modelo más adecuado en condiciones de poca disponibilidad de agua.

El comportamiento térmico descrito en este apartado por los tres modelos de cubierta influirá en el comportamiento energético de cualquier vivienda en la cual se instalen estos sistemas. El comportamiento energético de una vivienda, especialmente en el caso de rehabilitación, dependerá de la interacción de los diferentes sistemas constructivos de cubierta con el resto de la envolvente térmica del edificio y del funcionamiento de las propias soluciones constructivas de cubierta, además de otras variables ambientales, de orientación, ventilación, etc. En sucesivos apartados se analizarán estos aspectos, ya que la aplicación real de las cubiertas ajardinadas debe considerar las diferentes variables que afectan a su influencia en el comportamiento energético de un edificio.





## 7. SIMULACIONES ENERGÉTICAS CON ENERGYPLUS Y OPENSTUDIO

La monitorización de las maquetas ha permitido estudiar y ampliar el conocimiento sobre el comportamiento térmico en las diferentes capas de las cubiertas ajardinadas (véase apartado 6.6). Las dimensiones reducidas de las maquetas, así como su propia naturaleza de modelos aislados de estudio, ha permitido obtener datos de temperatura y humedad con facilidad al presentar ciertas ventajas de ubicación, montaje y control. Aun así, no ofrecen información sobre cómo el comportamiento térmico de estas cubiertas ajardinadas influye en el consumo energético de una vivienda. En el contexto de la rehabilitación de edificios energéticamente obsoletos (véase apartado 3.1.2.2.1) es necesario dar un paso más y estudiar las cubiertas ajardinadas como herramientas de rehabilitación viables.

En muchas ocasiones, gran parte de las características y ventajas de las cubiertas ajardinadas (véase apartado 3.1) no se pueden investigar de forma simultánea con mediciones *in situ* realizadas con *data-loggers* y sondas sobre cubiertas construidas, por lo que se hace necesario la realización de modelos informáticos que permitan estudiar el comportamiento energético de estos sistemas ajardinados. Gracias a estos modelos se pueden obtener datos con los que seguir profundizando en las propiedades y comportamiento de las cubiertas, o se puede comparar esta información con datos obtenidos de cubiertas construidas, con la intención de verificar y llegar a conclusiones más certeras y ajustadas sobre el comportamiento real de las cubiertas.

Para ello, se han propuesto varias simulaciones energéticas, que empleando un programa informático aceptado para la certificación energética en España, pretenden profundizar en la modificación del comportamiento energético que se produce en una vivienda al instalar estos sistemas de cubierta. Se entiende, por lo tanto, como un paso más tras el estudio de los modelos de cubiertas en maquetas de  $1 \times 1 \text{ m}^2$ , dándoles a estos sistemas constructivos una aplicación real. Se opta, en este caso, por el uso de simulaciones informáticas. Con ellas se han podido analizar mayor cantidad de hipótesis de rehabilitación, diferentes tipos de viviendas, ubicaciones, etc. Las variables estudiadas y la información obtenida son más amplias, a la vez que se consolida el modelo de cálculo de cubiertas ajardinadas en los programas informáticos, necesarios para la certificación energética de cualquier vivienda a construir, rehabilitar, comprar o vender en España. Los valores obtenidos en el estudio de las maquetas de modelos de cubierta a escala (véase apartado 6) no difieren de los que se emplean en las herramientas informáticas, y por ello se emplean estas simulaciones para analizar mayor cantidad de variables de las que sería posible en un estudio real.

### 7.1 SISTEMAS DE MODELIZACIÓN

El modelaje más simple del comportamiento térmico de una cubierta ajardinada considera únicamente el valor de la transmitancia térmica ( $U$ ) de la cubierta<sup>1</sup>. Del Barrio<sup>2</sup> dividió conceptualmente la cubierta en tres partes principales (capa de vegetación, substrato y cuerpo de la cubierta), y estudió el balance de calor de cada una de ellas, teniendo en cuentas las interacciones entre las tres partes, el ambiente exterior y el aire interior. Kumar y Kaushik<sup>3</sup> desarrollaron un modelo matemático basado en el trabajo de Del Barrio con la intención de evaluar, no solo el impacto térmico de la cubierta ajardinada, sino también el factor solar y de sombra, validando el modelo en los experimentos que realizaron en Yumuna Nagar (India).

En el modelo FASST (del inglés *Fast All-season Soil STrength*), desarrollado por Frankenstein y Koenig<sup>4</sup>, se consideran solo dos balances de calor: en la superficie entre el substrato y la cubierta y en la superficie entre el substrato y la vegetación. En este caso influyen muchos más parámetros, como la altura de la vegetación,

1 Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R. 2012.

2 Del Barrio, E.P. 1998.

3 Kumar, R., Kaushik, S.C. 2005.

4 Frankenstein, S., Koenig, G. 2004.



el LAI, el porcentaje de cobertura o el albedo. Sailor<sup>5</sup> desarrolló un modelo inspirado en las ecuaciones del modelo FASST, integrándolo en el programa EnergyPlus y validándolo en una investigación llevada a cabo en un edificio de la *Florida University* (Estados Unidos).

Jaffal *et al.*<sup>6</sup> dividieron el balance de calor en dos partes, al igual que el modelo FASST, basándose y validando las ecuaciones de los trabajos de Sailor y Frankenstein y Koenig. Posteriormente integraron el modelo matemático en el programa TRNSYS, y lo validaron en el estudio del comportamiento térmico de una cubierta ajardinada de 96 m<sup>2</sup> en una vivienda unifamiliar situada en La Rochelle (Francia).

Feng *et al.*<sup>7</sup> introdujeron el concepto de la fotosíntesis en los cálculos de los balances térmicos, mientras que Lazzarin *et al.*<sup>8</sup> desarrollaron un modelo para la medición del comportamiento térmico basado en diferencias finitas considerando varios niveles dentro de la cubierta ajardinada.

Alexandri y Jones<sup>9</sup> desarrollaron un modelo bidimensional centrado en el comportamiento de las cubiertas y los muros ajardinados en el caso concreto de ubicarse en cañones urbanos, aplicando estos datos al estudio posterior de las temperaturas dentro del cañón y sobre la cubierta, en nueve climas típicos.

En general, aunque parece que el modelo de Sailor<sup>10</sup> es el que mejor se adapta a la evaluación del comportamiento térmico de las cubiertas, se asume que en todos los modelos mencionados se presentan ciertas simplificaciones con el fin de llegar a representar fenómenos de transferencia de calor de una manera relativamente simple, pero efectiva<sup>11</sup>.

Aparte de los programas ya mencionados, empleados en la bibliografía estudiada como herramientas de simulación energética y análisis del comportamiento energético y térmico de las cubiertas ajardinadas como parte de la envolvente de un edificio, como EnergyPlus o TRNSYS, la modelización y simulación del comportamiento de una cubierta ajardinada también se puede realizar mediante el programa ENVI-met. Se trata de un modelo numérico de diseño 3D que puede simular interacciones superficiales entre substrato-vegetación-aire en ambientes urbanos, con escalas que comprenden desde un edificio aislado hasta un barrio compuesto por 250 manzanas, como máximo<sup>12</sup>. Permite conocer y estudiar no solo las características y el comportamiento energético de la cubierta ajardinada, sino también analizar sus beneficios ambientales o simular el comportamiento microclimático del entorno<sup>13</sup>. Fahmy *et al.*<sup>14</sup> lo aplicaron para el estudio de la vegetación urbana y su efecto en el clima de la ciudad para dos barrios de El Cairo (Egipto).

### 7.1.1 EnergyPlus

En esta tesis se plantea una simulación energética de un modelo de vivienda cuya construcción es previa a la NBE-CT-79. Se plantean diferentes propuestas de rehabilitación que se describirán en apartados posteriores. La cantidad de simulaciones a realizar, variables y situaciones a valorar hace necesario el empleo un programa de simulación energética, adecuado para este campo de estudio. De acuerdo con la revisión de bibliografía, el programa escogido ha sido EnergyPlus.

EnergyPlus es un motor de cálculo de balances térmicos desarrollado por el *United States Department of Energy* (DOE). Se trata de una versión desarrollada a partir de las herramientas de simulación DOE-2 y BLAST, también creadas por el DOE en los años 70, combinando en EnergyPlus lo mejor de ambas.

5 Sailor, D.J. 2008.

6 Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.

7 Feng, C., Meng, Q., Zhang, Y. 2010.

8 Lazzarin, R.M., Castellotti, F., Busato, F. 2005.

9 Alexandri, E., Jones, P. 2008.

10 Sailor, D.J. 2008.

11 Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R. 2012.

12 Fahmy, M., Sharples, S., Yahya, M. 2010.

13 *Ibidem*.

14 *Ibidem*.



Se trata de una herramienta de simulación de código abierto, gratuita, y en constante actualización y mejora, ya que forma parte de la cartera de programas de modelado energético de edificios de la *Building Technologies Office* (BTO) del DOE. La continua mejora y actualización de las variables que pueden ser modificadas en esta herramienta ha hecho de EnergyPlus uno de los programas de cálculo energético más atractivos por su versatilidad<sup>15</sup>.

Además, el empleo de este programa en gran cantidad de investigaciones en todo el mundo, junto con su desarrollo continuo, han dado validez a los resultados obtenidos<sup>16</sup>. Así, en España ha sido reconocido por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico y por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana<sup>17</sup> como un motor de cálculo de referencia. Esto quiere decir que se puede emplear en la evaluación del comportamiento energético de los edificios, ya que la precisión de EnergyPlus se considera contrastada. Otros motores de cálculo que forman parte de este grupo son LIDER-CALENER o TRNSYS. Este último también aparece empleado en un número importante de investigaciones consultadas en la bibliografía<sup>18</sup>.

Además, EnergyPlus implementa el modelo de cálculo de cubierta ajardinada desarrollado por Sailor<sup>19</sup>, basado en el trabajo de Frankenstein y Koenig<sup>20</sup>. Se trata de una adaptación bastante precisa del comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas al instalarse en un edificio como herramienta de ahorro energético. De acuerdo con Oldboukhitine *et al.*<sup>21</sup>, a pesar de que el modelo planteado por Sailor presenta algunas simplificaciones, considera suficientes fenómenos de transferencia térmica de calor entre los componentes de la cubierta ajardinada, especialmente entre las capas de vegetación y sustrato, cuyo comportamiento en relación con la transmisión de calor es más complejo.

Por lo tanto, además de tratarse de un motor de cálculo energético aceptado en el ámbito de la certificación energética en España, contiene un modelo de cálculo de cubierta ajardinada suficientemente completo y ampliamente validado y empleado en diferentes investigaciones. Así, a pesar de no tratarse de alguno de los programas más conocidos y empleados para la validación del cumplimiento de la normativa energética española (Herramienta Unificada LIDER/CALENER -HULC-, CYPETHERM, CE3, CE3X o CERMA)<sup>22</sup> se ha escogido este programa por su amplio uso internacional y el modelado del sistema de cubierta ajardinada.

Cabe considerar que EnergyPlus no es, en sí mismo, una interfaz de usuario: las entradas y salidas son solamente texto. Esto hace que su utilización sea compleja, por lo que para solucionar este problema se deben emplear interfaces gráficas secundarias que facilitan la introducción de parámetros. Hay gran cantidad de interfaces gráficas diseñadas a propósito para este motor de cálculo, pero se ha optado por OpenStudio ya que es la empleada mayoritariamente en los trabajos desarrollados por el propio DOE. De hecho, tanto EnergyPlus como OpenStudio forman parte de la mencionada cartera de programas de modelado energético de edificios de la DOE BTO<sup>23</sup>.

Además, OpenStudio también es una herramienta de código abierto y permite la colaboración con el programa de diseño gráfico SketchUp, facilitando así el diseño geométrico del edificio a analizar con EnergyPlus. Para ello es necesario emplear el SketchUp Plug-in<sup>24</sup>.

15 Muñoz, V.B. 2016; U.S. Department Of Energy's Building Technologies Office (DOE BTO). 2022.

16 Al-Zubaydi, A.Y.T. 2013; Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., *et al.* 2013; Catalina, T., Virgone, J., Blanco, E. 2008; Fernández-Salvador, V. 2012; Sailor, D.J. 2008; Yazdani, H., Baneshi, M. 2021; Zinzi, M., Agnoli, S. 2012; Ziogou, I., Michopoulos, A. Voulgari, V. *et al.* 2017.

17 Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020.

18 Jaffal, I., Ouldoukhitine, S.-E., Belarbi, R. 2012; Lazzarin, R.M., Castellotti, F., Busato, F. 2005; Niachou, A., Papakonstantinou, K., Santamouris, M., *et al.* 2001; Ouldoukhitine, S.-E., Belarbi, R., Sailor, D.J. 2014; Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., *et al.* 2007.

19 Sailor, D.J. 2008.

20 Frankenstein, S., Koenig, G. 2004.

21 Ouldoukhitine, S.-E., Belarbi, R., Sailor, D.J. 2014.

22 Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. 2022b.

23 DOE BTO. 2022.

24 Alliance for Sustainable Energy, LLC. 2022.



### 7.1.2 Validación del programa

Para comprobar el correcto manejo del programa EnergyPlus se ha procedido a emplear de manera coordinada los programas SketchUp, OpenStudio y EnergyPlus para el cálculo de la demanda energética de un edificio. Para ello se ha escogido un Trabajo Final de Grado (TFG) en el que se detalla el modelado energético de un sector de la sexta planta de la Escuela de Ingeniería de Barcelona Este (EEBE), de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)<sup>25</sup>. Se ha escogido este trabajo ya que ofrece una considerable cantidad de datos que han facilitado la reproducción de la investigación, permitiendo una posterior comparación de resultados, hecho que no ocurre, por ejemplo, en artículos de revista, de longitud más reducida.

La similitud entre los valores obtenidos en el TFG y los conseguidos con la reproducción del modelado confirman una correcta introducción de todas las variables (geometría, sistemas constructivos, horarios, cargas internas, sistemas de climatización, datos climáticos, etc.) y una comprensión del funcionamiento de los tres programas que se han empleado en el desarrollo del modelado energético. En la figura 7.1 se pueden observar los consumos energéticos de calefacción y refrigeración del modelo del TFG y el simulado, junto con la temperatura ambiente media a lo largo de los doce meses estudiados. Ambas gráficas son muy similares, encontrando tan solo diferencias relevantes en los meses de mayo, septiembre y octubre. En la figura 7.1 inferior, obtenida en la reproducción del modelo, el consumo de refrigeración en mayo es más elevado, mientras que el de calefacción es sensiblemente menor. En septiembre y octubre el consumo de refrigeración es mayor que en los datos obtenidos en el TFG. Esto puede deberse al hecho de que la superficie de huecos del TFG y del modelo de validación son ligeramente diferentes, ya que no se disponía de ningún plano correctamente acotado de la zona a simular. Esta diferencia en la superficie de huecos puede suponer un aumento de las ganancias térmicas por radiación solar a través de las ventanas en verano, traducándose en un mayor consumo energético de refrigeración.

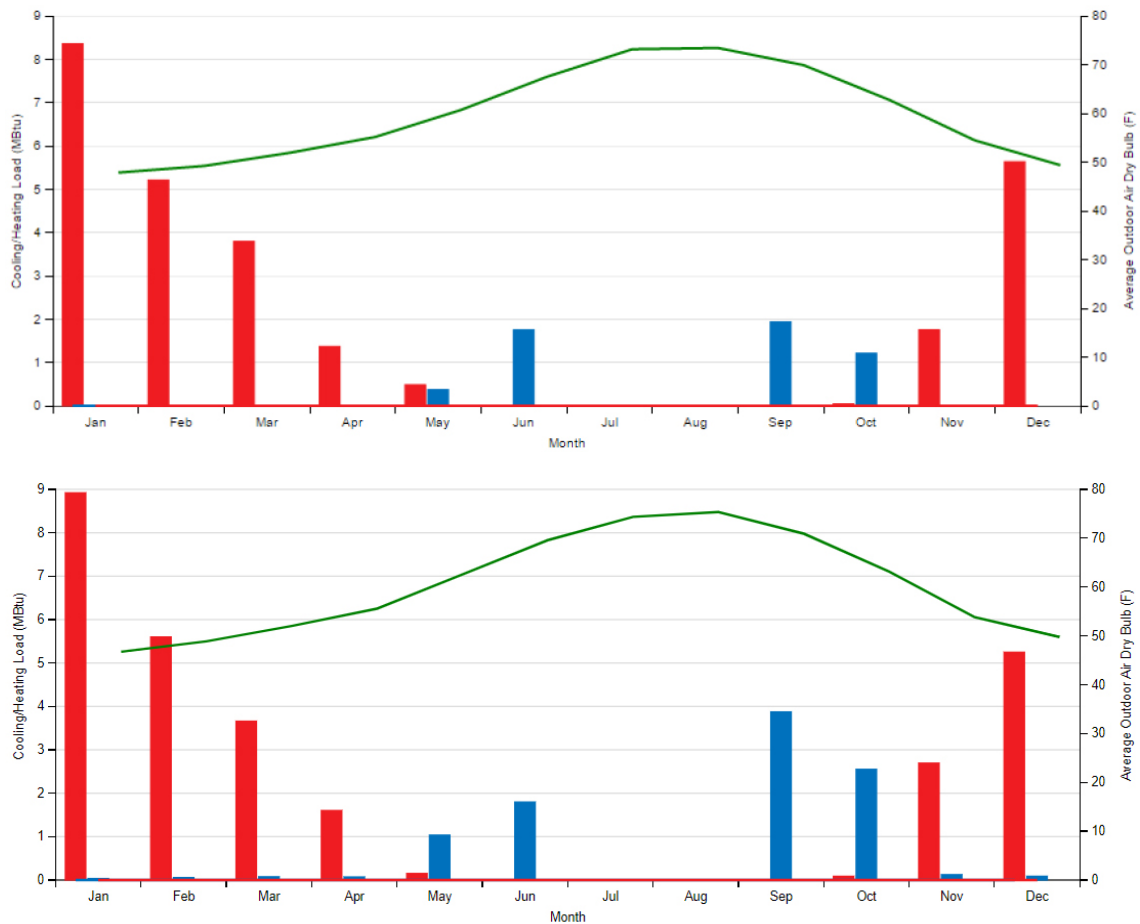


Figura 7.1. Consumo energético de refrigeración (azul) y calefacción (rojo) (MBtu) junto a temperatura ambiente (°F) del modelo del TFG (sup.) y del modelo reproducido para la validación (inf.)\*.

25 Bofill, N.C. 2017.



\* En las gráficas obtenidas directamente del programa los consumos energéticos de refrigeración y calefacción se indican en MBtu (del inglés Mega or Million British Thermal Unit). La equivalencia a kWh es de 1 MBtu = 293 kWh. En el caso de la temperatura ambiente, los datos se muestran en grados Fahrenheit (F). Para la conversión a grados Celsius (C) se emplea la fórmula siguiente:  $C = (F-32)/1,8$ , siendo  $1\text{ }^{\circ}\text{F} = -17,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

En las figuras 7.2 y 7.3 se observa la energía final (*Site Energy*) y la suministrada (*Source Energy*), tanto energía primaria como secundaria, consumidas por la sección del edificio estudiado. Se compara la energía final, ya que será la que se estudie al analizar los datos de la posterior investigación de esta tesis. La elección se basa en la propia definición, ya que la energía final es aquella que ha sido aprovechada por los sistemas instalados en la vivienda, por lo tanto, es la energía consumida por un edificio y reflejada en sus facturas. En el CTE DB-HE se limita la energía primaria (suministrada) total y la proveniente de fuentes no renovables<sup>26</sup>. Estas comprobaciones se realizarán de forma puntual a lo largo del desarrollo de la investigación, pero quedan fuera del alcance de este estudio, ya que en este caso se busca analizar el alcance del ahorro energético en el consumo de energía del edificio (energía final) obtenido tras mejorar los sistemas constructivos e instalar soluciones más sostenibles.

	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m <sup>2</sup> ]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m <sup>2</sup> ]
Total Site Energy	73.06	122.84	122.84
Net Site Energy	73.06	122.84	122.84
Total Source Energy	242.74	408.16	408.16
Net Source Energy	242.74	408.16	408.16

Figura 7.2. Consumo de energía final y suministrada total, por m<sup>2</sup> y por m<sup>2</sup> acondicionado del modelo del TFG\*.

	Total Energy [GJ]	Energy Per Total Building Area [MJ/m <sup>2</sup> ]	Energy Per Conditioned Building Area [MJ/m <sup>2</sup> ]
Total Site Energy	77.41	137.11	137.11
Net Site Energy	77.41	137.11	137.11
Total Source Energy	236.69	419.26	419.26
Net Source Energy	236.69	419.26	419.26

Figura 7.3. Consumo de energía final y suministrada total, por m<sup>2</sup> y por m<sup>2</sup> acondicionado del modelo reproducido para la validación\*.

\* En las tablas obtenidas directamente del programa los valores de energía final y suministrada se indican en GJ, siendo la equivalencia a kWh de 1 GJ = 277,78 kWh.

La energía total final es de 20 294,44 kWh (73,06 GJ) en la tabla extraída del TFG, mientras que en el modelo reproducido es de 21 502,78 kWh (77,41 GJ), produciéndose una variación del 5,9 %. Los datos aportados por el TFG son abundantes, pero no suficientes para reproducir en su totalidad las variables propias de un proyecto de modelado energético de un edificio. Por ello, esta variación menor al 10 % se considera aceptable.

Además, se ha realizado una validación de los modelos informáticos diseñados en esta tesis, con EnergyPlus y OpenStudio. Para ello se han comparado las temperaturas superficiales obtenidas en los diferentes modelos de cubierta con los datos de temperatura superficial recogidos por las sondas instaladas en las maquetas (véase apartado 6.4.2). Es decir, se confrontan los datos simulados con aquellos recogidos por las sondas A4, B4 y C5. A lo largo de todo el año se han obtenido una totalidad de 235 765 registros, considerando las 13 sondas instaladas en las tres maquetas. De todos estos datos, se escogen las fechas del 20 al 27-29 de enero de 2022 para validar las simulaciones informáticas. Tal como se indica en el apartado 6.6.2.3, se trata de unas fechas en las que se incluyen días previos a un período de lluvias, tres días de precipitaciones (23 al 25 de enero) y los días inmediatamente posteriores. Existe una importante variación del comportamiento térmico del substrato y la vegetación en función del agua almacenada, por lo que se ha considerado relevante simular un periodo de mayor complejidad al presentar días con un substrato seco y poca disponibilidad de agua y días con mayor humedad acumulada en el substrato tras las lluvias. En el caso de los modelos A y C, se estudia desde el día 20 hasta el 29, mientras que en el modelo B, debido a un fallo en las sondas el día 28 a las 9:00 h, se comparan tan solo los datos del día 20 al 27 de enero (Figura 7.4).



La raíz del error cuadrático medio (RECM, o RMSE del inglés *root-mean-square error*) obtenido al comparar los valores reales y experimentales de temperatura superficial es de 2,7, 1,7 y 2,6 para los modelos A, B y C, respectivamente. Estos valores están en consonancia con los resultados obtenidos por otros autores<sup>27</sup>.

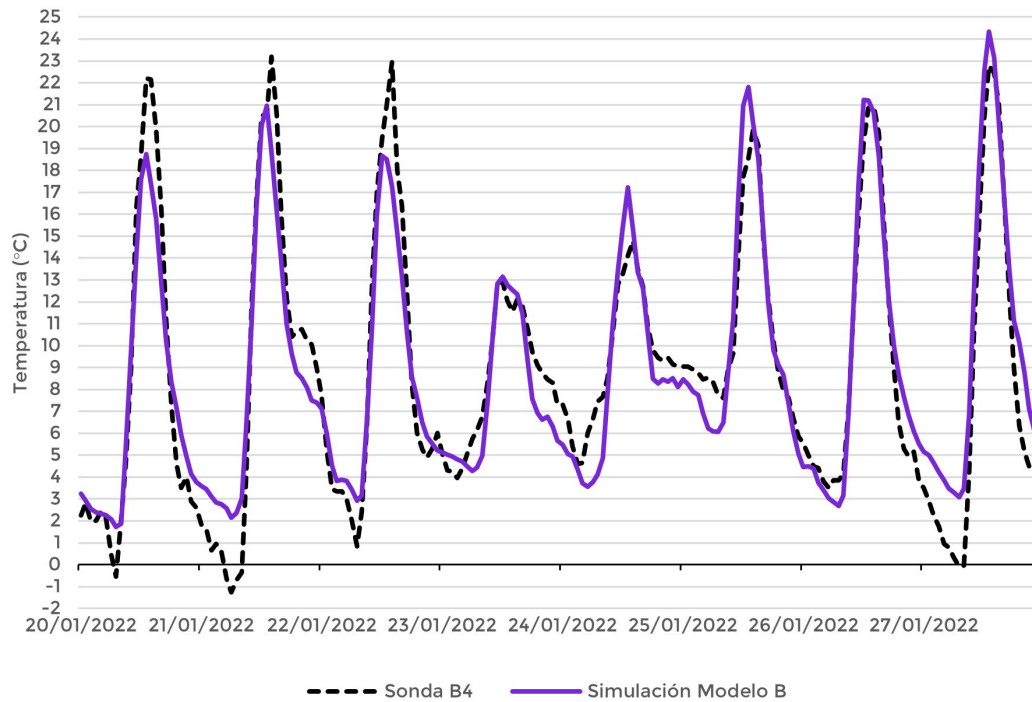


Figura 7.4. Temperatura superficial exterior (°C) de la maqueta (Sonda B4) y de la simulación energética (Simulación Modelo B) entre el 20 y el 27 de enero de 2022.

Por otro lado, tras la consulta bibliográfica realizada, el modelo de cálculo de cubiertas ajardinadas integrado en EnergyPlus se considera suficientemente validado. Se han publicado, en revistas de reconocido prestigio, diferentes investigaciones que emplean este programa para el análisis energético de las cubiertas ajardinadas, confirmando el correcto funcionamiento y aproximación a la realidad de este modelo de cálculo en relación con las transferencias de calor en las capas del sustrato y la vegetación<sup>28</sup>. Para la modelización realizada en esta investigación se han tomado de la bibliografía parámetros y valores necesarios para diseñar las cubiertas ajardinadas en OpenStudio y EnergyPlus.

<sup>27</sup> Gomes, M.G., Silva, C.M., Valadas, A.S., *et al.* 2019; Ouldoukhithine, S.-E., Belarbi, R., Sailor, D.J. 2014; Sailor, D.J. 2008.

<sup>28</sup> Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., *et al.* 2013; Yazdani, H., Baneshi, M. 2021; Zinzi, M., Agnoli, S. 2012; Ziogou, I., Michopoulos, A. Voulgari, V. *et al.* 2017.



## 7.2 EDIFICIO DE REFERENCIA Y PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

Se plantea el análisis energético de una vivienda unifamiliar adosada, de 77,2 m<sup>2</sup>, construida en entre las décadas 1950 y 1960, con anterioridad a la entrada en vigor de la NBE-CT-79 (Figura 7.5). Esta vivienda se ubica en València y sus sistemas constructivos responden a los propios de la etapa en la que se construye<sup>29</sup> (véase Anexo III), con un sistema estructural mixto de pilares de ladrillo y muros de carga. Debido a su construcción previa a 1980 y al hecho de que no se ha producido ninguna rehabilitación integral, la envolvente del edificio no dispone de aislamiento térmico. Partiendo de este edificio inicial, se plantean varias simulaciones energéticas en las que se mejoran térmicamente diferentes elementos constructivos, así como se proponen tres sistemas constructivos de cubierta, de acuerdo con los modelos A (acabado de grava), B (ajardinada extensiva) y C (ajardinada intensiva) construidos en maquetas a escala y monitorizados con *data-loggers* de humedad y temperatura. Igualmente, se deben tener en cuenta las diferentes tipologías existentes en una ciudad y la influencia de las cubiertas ajardinadas en el comportamiento energético de un edificio en función del número de plantas. Por ello se plantea también el análisis de esta misma vivienda, como parte de un edificio residencial de varias alturas (Figura 7.6). A continuación, se enumeran las diferentes circunstancias simuladas:

- Vivienda unifamiliar adosada sin aislamiento en la envolvente (Modelo de referencia).
- Rehabilitación con mejora de la transmitancia térmica solo de la cubierta:
  - Con sistema constructivo tradicional invertido con acabado de grava (Modelo A).
  - Con sistema constructivo ajardinado extensivo (Modelo B).
  - Con sistema constructivo ajardinado intensivo (Modelo C).
- Rehabilitación con mejora de la transmitancia térmica de toda la envolvente térmica del edificio:
  - Con sistema constructivo tradicional invertido con acabado de grava (Modelo A).
  - Con sistema constructivo ajardinado extensivo (Modelo B).
  - Con sistema constructivo ajardinado intensivo (Modelo C).
- Vivienda en edificio sin aislamiento en la envolvente (Modelo de referencia):
  - Edificio de 2 plantas.
  - Edificio de 3 plantas.
  - Edificio de 4 plantas.
  - Edificio de 5 plantas.
  - Edificio de 6 plantas.
- Vivienda en edificio con rehabilitación solo de la cubierta instalando un sistema ajardinado extensivo (Modelo B):
  - Edificio de 2 plantas.
  - Edificio de 3 plantas.
  - Edificio de 4 plantas.
  - Edificio de 5 plantas.
  - Edificio de 6 plantas.

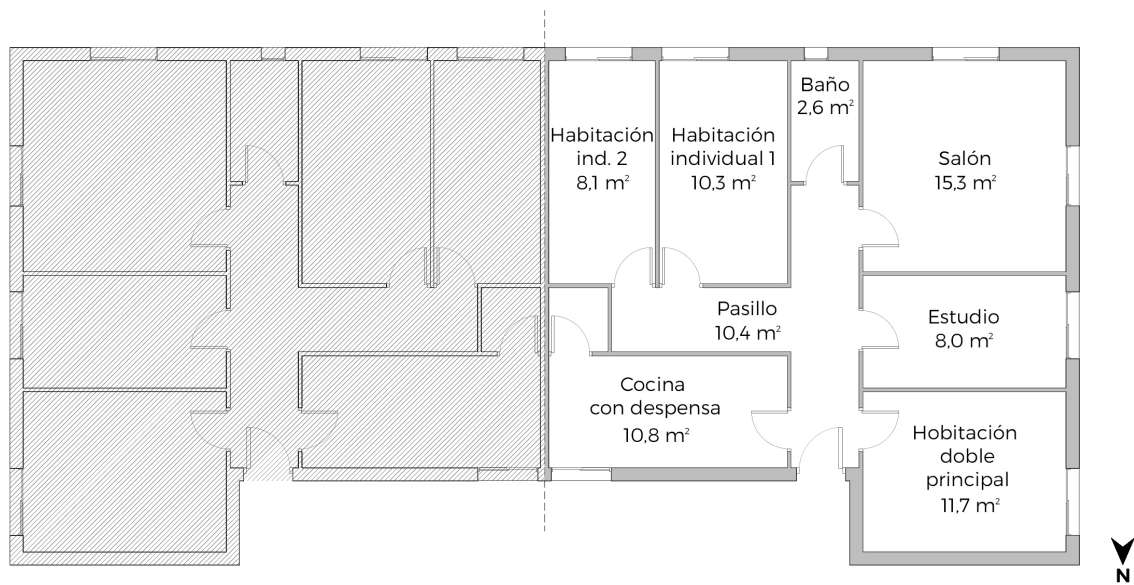


Figura 7.5. Vivienda unifamiliar adosada: distribución de espacios interiores y dimensiones (m<sup>2</sup>).

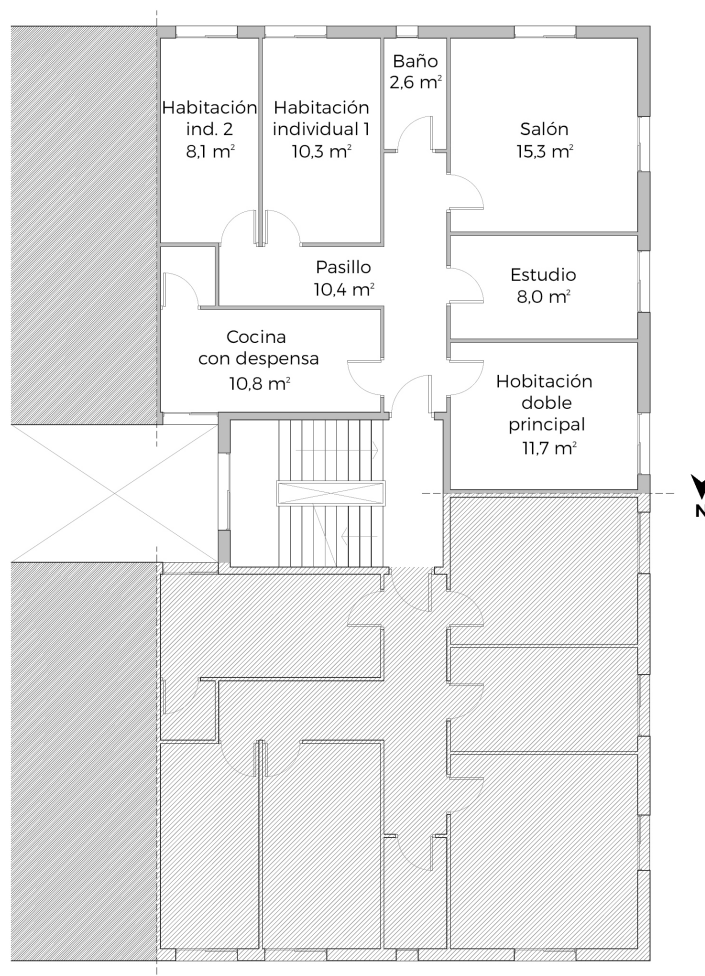


Figura 7.6. Vivienda en edificio residencial: distribución de espacios interiores y dimensiones (m<sup>2</sup>). Primera planta, cota + 3,65 m.





### 7.2.1 Modelo de referencia

Como se ha indicado, el modelo de referencia se considera construido en los años 50 y 60 del siglo XX. La falta de una normativa que regulara la instalación de material aislante en la envolvente térmica del edificio hasta 1980, junto con el análisis de los sistemas constructivos propios de la ciudad de València y alrededores en aquellas décadas<sup>30</sup>, ha concluido en la determinación de una serie de sistemas constructivos con una elevada transmitancia térmica (Tabla 7.1). Estos valores se obtienen a través del programa EnergyPlus, en el que hemos introducido el espesor, conductividad térmica, densidad y calor específico de cada una de las capas que componen estos sistemas. Toda la información de este apartado se amplía en el Anexo III, ya que la entrada de datos en EnergyPlus es amplia y no puede recogerse al completo en estas líneas.

ENVOLENTE TÉRMICA	U (W/m <sup>2</sup> K)	
	Modelo de referencia	Límite CTE DB-HE
Cubierta	1,404	0,330
Fachada	3,018	0,380
Medianera	2,520	0,750
Solera	5,253	0,690
Puerta de acceso	4,200	5,700
Ventanas (vidrio + marco)	5,689	2,000

Tabla 7.1. Transmitancia térmica (U=W/m<sup>2</sup>K) de los elementos de la envolvente térmica del modelo de referencia y límite de transmitancia térmica establecido por el DB-HE.

Una vez determinada la construcción de la vivienda, distribuida de acuerdo con la Figura 7.5, se consideran los usos y cargas internas que influirán, junto a la envolvente térmica y las condiciones climáticas exteriores, en el consumo energético de la vivienda (Tabla 7.2). La vivienda está compuesta por salón, cocina, baño, habitación doble principal, dos habitaciones individuales, estudio y pasillo. Se considera que en ella vivirá una familia de cuatro personas, siendo dos personas adultas y dos niños/jóvenes. Será necesario determinar no solo las cargas internas derivadas de la ocupación de los espacios y las actividades desarrolladas, las luces o los equipos eléctricos, sino también una serie de horarios de uso de cada uno de los espacios en función de las rutinas diarias de la familia, que se combinarán con las cargas para determinar las necesidades de climatización de cada espacio.

ESPACIOS	OCUPACIÓN	ILUMINACIÓN (W)	EQUIPOS ELÉCTRICOS (W)	ZONAS TÉRMICAS	VENTILACIÓN (ACH)
Salón	4	36	235	1	1,55
Cocina	4	46	4750	2	1,90
Baño	1	18	-	3	7,88
Habitación doble	2	34	-	4	0,85
Habitación individual	1	23	-	4	0,85
Estudio	2	36	180	1	1,55
Pasillo	1	24	-	5	-

Tabla 7.2. Resumen de cargas internas en la vivienda modelada: ocupación (número de personas), iluminación (W), equipos eléctricos (W), zonas térmicas y ventilación natural (ACH).

Respecto a las filtraciones de aire y la ventilación, en primer lugar, se considera que la vivienda no ha sufrido ninguna rehabilitación integral y se ubica en un clima cálido como es el de València, por lo que los sistemas constructivos presentan unas filtraciones de aire elevadas. Se toma en este caso un valor de 0,7 ACH (del inglés *Air Changes per Hour*), sobre un máximo de 1 ACH<sup>31</sup>. En cuanto a la ventilación, todas las estancias, a excepción del pasillo, disponen de ventanas al exterior. Además, la vivienda se diseñó sin ningún sistema de ventilación mecánica, por lo que tan solo se considera una ventilación natural, en este caso

30 IVE. 2011.

31 Levitt, B. 2017.



siguiendo las indicaciones de la normativa vigente<sup>32</sup>. Se diseñan cuatro tipos de ventilación natural, una para cada zona térmica (considerando que el pasillo no dispone de ventilación natural).

Como los sistemas de climatización no son objeto directo de estudio en este trabajo, no se han modelado sistemas completos de HVAC (del inglés *Heating-Ventilation-Air Conditioning*), con sus respectivas características, partes del sistema, etc. Se ha optado por la opción *Ideal Air Loads System*. Este componente de EnergyPlus y OpenStudio se considera como una unidad ideal de climatización que agrega o elimina calor y humedad de los espacios interiores con una eficiencia del 100 % para producir un suministro de aire en las condiciones especificadas<sup>33</sup>. En este caso las temperaturas de consigna para el sistema de calefacción y refrigeración son de 21 °C y 25 °C, respectivamente<sup>34</sup>.

## 7.2.2 Propuestas de rehabilitación

En las propuestas de rehabilitación del modelo de referencia se deben diferenciar los dos casos mencionados en el apartado 7.2: con mejora de la transmitancia térmica solo de la cubierta y con mejora de la transmitancia térmica de toda la envolvente térmica.

### 7.2.2.1 Mejora de la transmitancia térmica de la cubierta

Las propiedades más importantes de los materiales que componen las capas de las cubiertas A, B y C (Figura 7.7) se resumen en la Tabla 7.3. Debido a que, en el caso de las capas de substrato y vegetación el número de variables a introducir es más elevado, se amplía esta información en el Anexo III.

	MODELO A	MODELO B	MODELO C
<b>Propiedades de la vegetación</b>		<b>Sedum</b>	<b>Gramíneas</b>
Altura (m)		0,10	0,40
LAI		0,80	5
Reflectancia de la hoja – albedo		0,22	0,30
Emisividad de la hoja		0,95	0,95
Resistencia estomática mínima (s/m)		300	120
<b>Propiedades del substrato</b>			
Espesor (m)		0,10	0,60
Conductividad del substrato seco (W/mK)		0,435	0,435
Densidad del substrato seco (kg/m <sup>3</sup> )		940	940
Calor específico del substrato seco (J/kgK)		1420	1420
Absorción solar		0,70	0,70
Humedad de saturación de la capa de substrato (volumétrico)		0,40	0,50
<b>Propiedades del acabado de grava</b>			
Espesor (m)	0,06		
Conductividad (W/mK)	2		
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	2200		
Calor específico (J/kgK)	1180		
Absorción solar	0,60		

Tabla 7.3. Principales datos necesarios para el modelado del acabado de los sistemas constructivos de las cubiertas de los modelos A, B y C.

32 Ministerio de Fomento. 2022b.

33 Big Ladder software. 2022.

34 Ministerio de Presidencia. 2021.



Cabe destacar que, tal y como se menciona en el apartado 6.6, el menor albedo de las gravas de color blanco, en comparación con el albedo de la superficie del sustrato oscuro influye en los datos obtenidos y en las temperaturas superficiales alcanzadas en cada modelo de cubierta. El albedo de la vegetación también es importante, aunque durante los periodos de estrés hídrico la escasa cobertura de la vegetación de la cubierta ajardinada autosuficiente sobre el sustrato hace que la diferencia entre el albedo de las gravas y el sustrato sea más relevante e influyente (véase apartado 6.5). Es por ello que, en EnergyPlus y OpenStudio, a partir de datos empleados y contrastados en otras investigados, se ha diseñado el sustrato con una mayor absorción solar (0,7) que las gravas de color blanco (0,6), ya que el programa permite modificar esta variable en lugar de introducir directamente el albedo de las diferentes superficies.

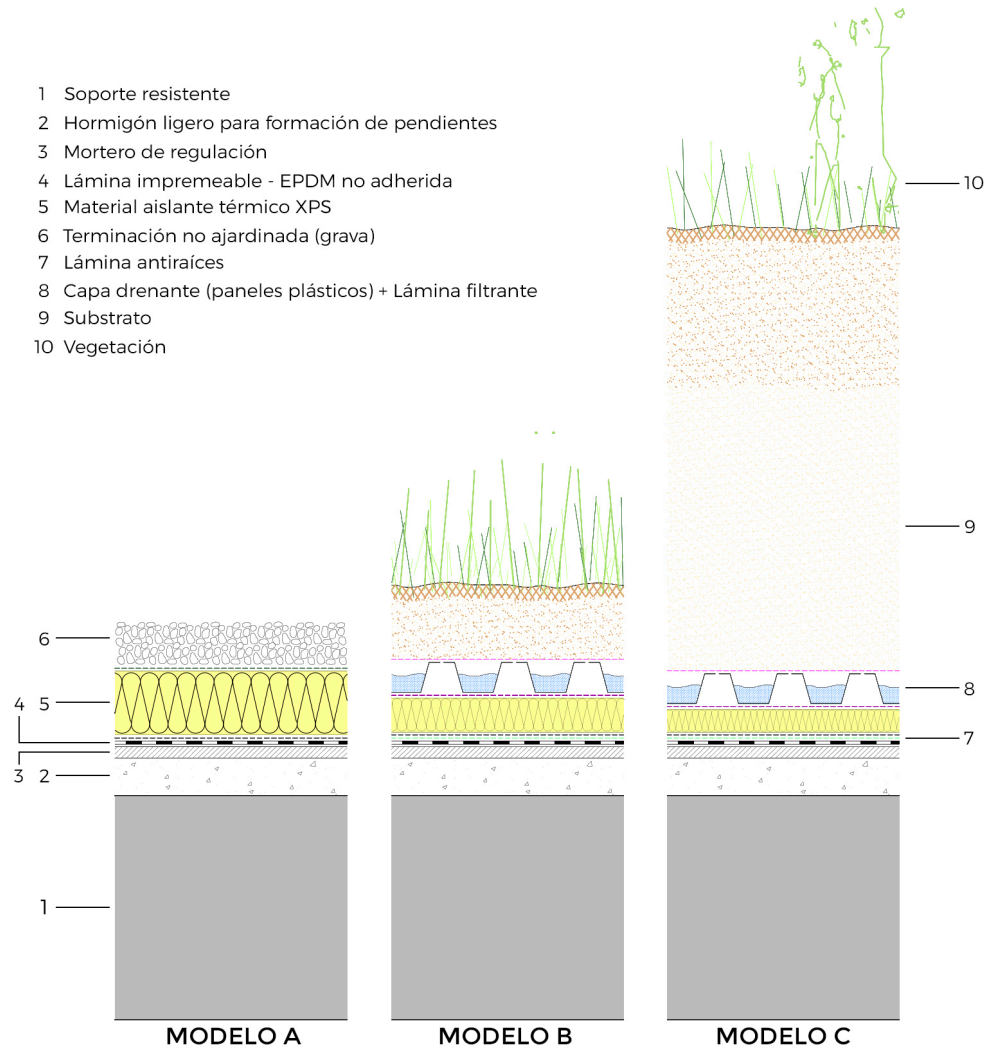


Figura 7.7. Modelos propuestos para rehabilitar la cubierta.

Los datos necesarios para la capa de vegetación no son fáciles de obtener. Por lo tanto, se lleva a cabo una revisión bibliográfica de investigaciones que hayan modelado, especialmente con EnergyPlus, cubiertas ajardinadas cuyas características de la vegetación se asemeje a las empleadas en este estudio. La información expuesta respecto a la vegetación se ha tomado de la investigación llevada a cabo por Ascione *et al.*<sup>35</sup>, que realizaron simulaciones con diferentes tipos de cobertura vegetal sobre la cubierta: *sedum* de tallo bajo, *sedum* de tallo alto, césped, gramíneas de tallo bajo y gramíneas de tallo alto. De acuerdo con las especies vegetales seleccionadas en las maquetas de los modelos B y C, los datos del *sedum* de tallo bajo y las gramíneas de tallo alto se adaptan a la vegetación empleada en las maquetas. Debido a que solo existen dos tipos de vegetación y no hay posibilidad de confusión, en esta investigación se denominarán, de manera simplificada, *sedum* y gramíneas. En relación con el sustrato, los datos necesarios se han obtenido de la

35 Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., *et al.* 2013.



ficha técnica del producto empleado en las maquetas<sup>36</sup> (Zincoterra “Floral” y Zincoterra “Jardín”) e investigaciones previas que aportan valores contrastados y fiables<sup>37</sup>.

Respecto a los horarios, cargas internas, filtraciones de aire, distribución de zonas térmicas y sistema de climatización, no se produce ningún cambio respecto al modelo de referencia.

#### **7.2.2.2 Mejora de la transmitancia térmica de toda la envolvente térmica**

Se propone mejorar la transmitancia térmica de todos los elementos de la envolvente: cubierta, fachada, medianera, solera, puerta de acceso y ventanas. Respecto a la cubierta, los valores indicados en el apartado 7.2.2.1 y ampliados en el Anexo III tienen validez, ya que se proponen los mismos sistemas constructivos (modelos A, B y C). En relación con fachada, medianera y solera, se creará un único material que cumplirá con la transmitancia límite exigida por normativa para la zona climática B (véase tablas 2.11, 2.12 y 7.1). Respecto al sistema constructivo, se propone la rehabilitación de la fachada con un Sistema de Aislamiento Térmico por el Exterior (SATE), instalando aislante térmico EPS al exterior con sus respectivas capas de revestimiento continuo con refuerzo de malla de fibra de vidrio. En el caso de la medianera, debido a la imposibilidad de actuar por el exterior (al ser parte de la propiedad colindante), se instalará material aislante por el interior mediante un trasdosado de paneles de yeso laminado. Por último, en la solera se levantará el pavimento para añadir una capa aislante y una lámina impermeable, asegurando la mejor térmica y evitando la ascensión de agua del terreno.

En el caso de la puerta exterior, el límite exigible es de  $5,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ , mientras que la puerta diseñada en el modelo de referencia ya cumplía con este valor ( $4,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Por lo tanto, es el único elemento que no sufre modificaciones. Respecto a las ventanas se mejora tanto el sistema acristalado como el marco. Se sustituye el vidrio monolítico de 6 mm de espesor por un vidrio con cámara 4-16 (90 % Argón)-4, bajo emisivo y control solar<sup>38</sup>. El marco de aluminio sin rotura de puente térmico (RPT) existente se sustituye por un marco de PVC de 3 cámaras con RPT. Esta información se amplía en el Anexo III.

En relación con las filtraciones de aire, una mejora del sistema constructivo, con una reducción de fallos o puntos débiles por los que puedan producirse entradas o salidas indeseadas de aire, implica una disminución del valor introducido en EnergyPlus hasta 0,1 ACH. Respecto a los horarios, cargas internas, distribución de zonas térmicas y sistema de climatización, no se produce ningún cambio respecto al modelo de referencia.

<sup>36</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021d; 2021e.

<sup>37</sup> Kazemi, M., Courard, L. 2022; Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., et al. 2022.

<sup>38</sup> Saint-Gobain. 2022.



## 7.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 7.3.1 Influencia de la cubierta<sup>39</sup>

Las hipótesis de rehabilitación planteadas, sobre un edificio sin aislamiento en la envolvente (o modelo de referencia), se basan en la mejora de la transmitancia térmica únicamente de la cubierta y la mejora de la transmitancia térmica de todos los elementos de la envolvente. Resulta importante entender el ahorro energético obtenido con cada uno de los supuestos de rehabilitación, introduciendo en el análisis de los resultados variables como el coste de construcción de las diferentes soluciones, mucho mayor en el caso de rehabilitar la totalidad de la envolvente térmica. Cabe recordar que, dentro del campo de la rehabilitación energética de viviendas, el coste de construcción y el peso propio de las soluciones empleadas son factores muy determinantes a la hora de tomar decisiones sobre la opción más viable de rehabilitación.

En este caso, es importante conocer la influencia de la cubierta sobre el ahorro en energía final total anual conseguido al rehabilitar térmicamente la totalidad de la envolvente. Rehabilitar únicamente la cubierta puede ser una opción energéticamente viable, o una opción poco recomendada. Partiendo del modelo de vivienda descrito en apartados anteriores, sin variaciones de orientación, geometría, etc., se procederá a analizar los factores climáticos que determinan la mayor o menor influencia de la cubierta en el ahorro energético. En este caso, el estudio se realiza para las seis zonas climáticas en las que se divide el territorio español. Las variaciones climáticas implican necesidades térmicas diferentes, por lo que se pretende detallar el comportamiento diferenciado para cada zona climática con la intención de mejorar la elección de las técnicas y sistemas constructivos más adecuados para optimizar la rehabilitación energética de edificios en cada entorno climático.

El CTE DB-HE divide el territorio español en seis zonas climáticas, de acuerdo con la temperatura ambiente y la radiación solar, por lo que, con la intención de estudiar la influencia de la cubierta en base a estas variables climáticas, se escogen seis ciudades que representan cada una de las Zonas Climáticas (ZC)  $\alpha$ -A-B-C-D-E (Figura 7.8, Tabla 7.4 y 7.5). La zona climática  $\alpha$  es la representativa de la zona costera de las Islas Canarias, mientras que en el resto del territorio se distribuyen las zonas climáticas restantes, desde las más cálidas (ZC A) hasta las más frías (ZC E). El CTE DB-HE determina una transmitancia límite para los diferentes elementos de la envolvente térmica en cada una de estas zonas climáticas<sup>40</sup>. Cuanto más frío es el clima, mayores necesidades de aislamiento en la envolvente y, por lo tanto, menores transmitancias térmicas límite.

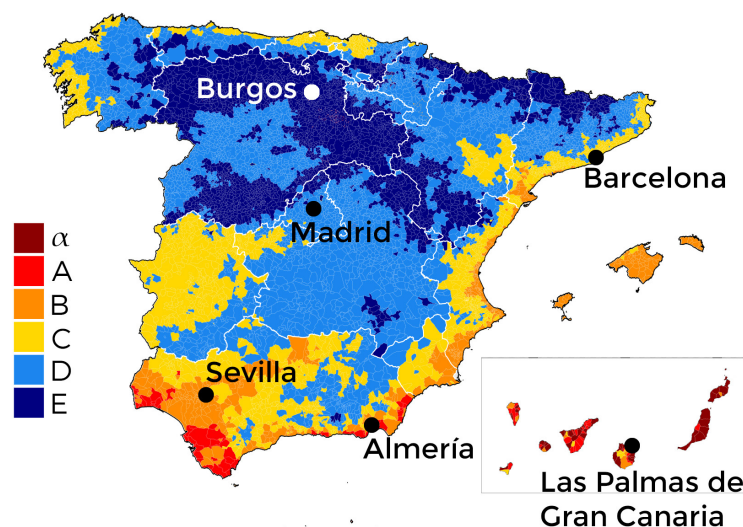


Figura 7.8. Mapa de zonas climáticas en España con ubicación de las seis ciudades escogidas.

<sup>39</sup> Los resultados de la investigación desarrollada en el apartado 7.3.1, en relación a la influencia de la cubierta en el ahorro energético, han sido publicados en *Energy for Sustainable Development*, bajo el título “Contribution of green roofs to energy savings in building renovations” (Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á. et al. 2022b.).

<sup>40</sup> Ministerio de Fomento. 2022a.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Las Palmas de Gran Canaria	19,7	19,6	19,4	19,3	19,2	19,1	19,1	19,6	20,6	21,6	22,5	23,0	23,3	23,4	23,3	23,1	22,7	22,1	21,3	20,7	20,4	20,2	20,0	19,8
Almería	17,6	17,3	17,0	16,7	16,5	16,3	16,4	17,0	18,2	19,8	21,0	21,8	22,3	22,6	22,7	22,5	22,1	21,5	20,6	19,7	19,0	18,5	18,2	17,9
Sevilla	16,6	16,0	15,5	15,1	14,7	14,4	14,3	14,8	15,8	17,5	19,3	20,9	22,4	23,5	24,1	24,9	24,9	24,4	23,4	21,9	20,3	19,3	18,3	17,3
Barcelona	16,1	15,8	15,5	15,3	15,1	15,0	15,1	15,5	16,3	17,1	17,9	18,6	19,0	19,3	19,3	19,2	18,9	18,5	18,0	17,5	17,1	16,8	16,6	16,3
Madrid	12,7	12,1	11,5	11,0	10,6	10,2	10,0	10,6	12,1	13,9	15,8	17,3	18,6	19,6	20,4	20,7	20,7	20,3	19,0	17,5	16,1	15,0	14,1	13,4
Burgos	8,5	8,2	7,8	7,5	7,3	7,0	6,9	7,4	8,6	10,1	11,7	13,2	14,4	15,2	15,8	16,0	15,8	15,1	14,1	12,7	11,3	10,2	9,4	8,9

Se indican las casillas con menor temperatura con azul oscuro y las de mayor temperatura con rojo oscuro. La transición se marca con azules y rojos más claros.

Tabla 7.4. Temperatura media anual por horas (°C) para cada ciudad.

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Las Palmas de Gran Canaria	0	0	0	0	0	0	0	10	94	298	482	589	646	659	662	660	612	491	290	92	7	0	0	0
Almería	0	0	0	0	0	9	174	384	600	688	721	729	713	678	617	519	360	179	52	4	0	0	0	0
Sevilla	0	0	0	0	0	0	131	328	524	641	678	687	675	645	596	518	387	222	76	6	0	0	0	0
Barcelona	0	0	0	0	0	48	179	324	484	562	594	599	582	545	481	373	240	118	33	3	0	0	0	0
Madrid	0	0	0	0	0	14	171	344	505	594	623	630	616	587	537	455	330	182	60	5	0	0	0	0
Burgos	0	0	0	0	0	14	125	252	387	481	517	527	517	490	444	367	264	153	57	9	0	0	0	0

Se indican las casillas con menor radiación solar en gris y las de mayor radiación solar con rojo oscuro. La transición se marca con rojos más claros.

Tabla 7.5. Radiación solar media anual por horas (W/m²) para cada ciudad.

Las transmitancias térmicas del modelo de referencia detalladas en la Tabla 7.1 quedan muy por encima de los valores límite establecidos para todas las zonas climáticas (Tabla 7.6). Por lo tanto, para cada una de las ciudades, se deberán diseñar las cubiertas de los modelos A, B y C con un espesor de material aislante concreto, y el resto de los elementos de la envolvente con un valor de transmitancia térmica particular, para cumplir con el límite establecido para su zona correspondiente. Como se puede observar en la tabla 7.6, únicamente el elemento de puerta principal presenta, en el modelo de referencia, una transmitancia térmica menor que el límite, por lo que este será el único elemento de la envolvente que no se mejorará en la rehabilitación, manteniéndose la transmitancia de 4,2 W/m²K en todas las zonas climáticas.

U (W/m²K)							
Elemento de la envolvente	Modelo de referencia	Zonas climáticas					
		α	A	B	C	D	E
Cubierta	1,40	0,50	0,44	0,33	0,23	0,22	0,19
Fachada	3,02	0,56	0,50	0,38	0,29	0,27	0,23
Solera	5,25	0,80	0,80	0,69	0,48	0,48	0,48
Medianera	2,52	0,90	0,80	0,75	0,70	0,65	0,59
Ventana	5,69	2,70	2,70	2,00	2,00	1,60	1,50
Puerta	4,20	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70	5,70

Tabla 7.6. Transmitancia térmica (U=W/m²K) de los elementos de la envolvente en el modelo de referencia (sin aislamiento) y el límite establecido por normativa para las diferentes zonas climáticas.



Se proponen dos supuestos de rehabilitación (véase apartado 7.2): mejora térmica solo de la cubierta y mejora térmica de la totalidad de la envolvente. Ambos casos se estudian para los tres modelos de cubierta (tradicional con acabado de grava (A), ajardinada extensiva (B) y ajardinada intensiva (C)), en cada una de las ciudades y durante todo un año (2021). El ahorro energético respecto al consumo de energía final total anual del modelo de referencia se ilustra en la figura 7.9.

Se observa como en el supuesto de rehabilitar solo la cubierta, independientemente del sistema constructivo empleado (A-B-C), siempre se consigue un cierto ahorro energético respecto al modelo de referencia. La reducción del consumo de energía va aumentando conforme el clima es más frío y con mayores variaciones de temperatura diarias y anuales. En el caso de Burgos (ZC E), la diferencia entre la máxima y mínima temperatura media anual es de 9,1 °C, y en Madrid (ZC D) de 10,7 °C. En estas dos ciudades el ahorro energético respecto al consumo total del modelo de referencia se sitúa en torno a los 2000-2500 kWh/año (Tabla 7.7). En cambio, en ciudades con menores variaciones térmicas, como es el caso de Las Palmas de Gran Canaria (4,3 °C), Almería (6,4 °C) o Barcelona (4,3°C), el ahorro energético conseguido rehabilitando la cubierta es más discreto. En el caso de Sevilla, la variación de la temperatura media diaria es de 10,6 °C, similar a la de Madrid, pero tanto la temperatura máxima media anual como la mínima son mayores que las de Madrid. En las ciudades situadas en zonas climáticas más cálidas el ahorro es menor: situándose en torno a los 300-350 kWh/año para la zona climática  $\alpha$  y entre 1000-1500 kWh/año en las zonas climáticas A, B y C. Estos valores son un 85 % y un 40-50 %, respectivamente, menores a los de las zonas climáticas más frías. Por lo tanto, la combinación de clima frío y grandes variaciones térmicas (ya que se trata de ciudades ubicadas en el interior, alejadas del mar, que funciona como regulador térmico) supone un aumento del ahorro energético obtenido en el supuesto de rehabilitar únicamente la cubierta.

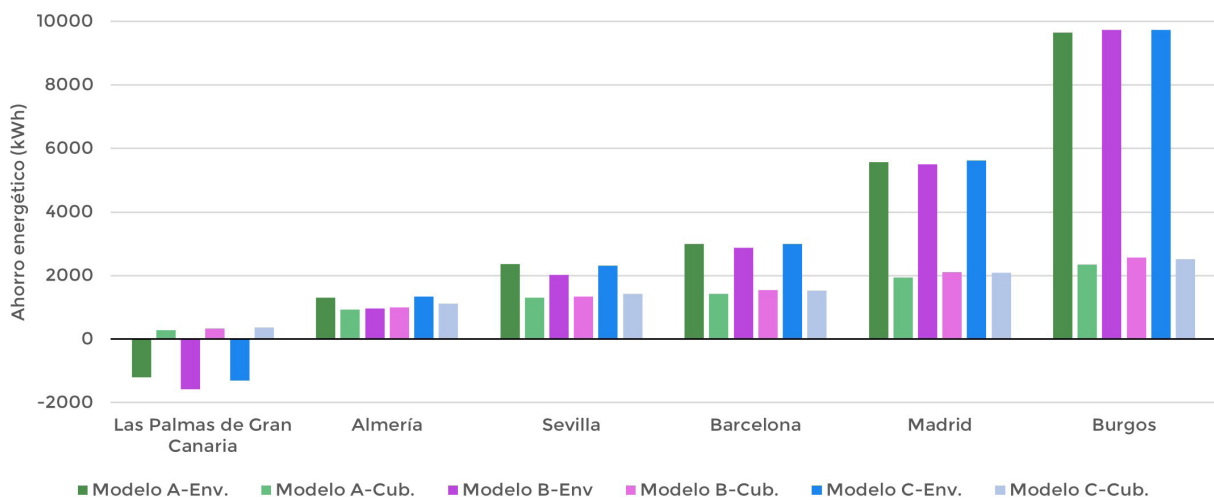


Figura 7.9. Ahorro energético (kWh) en relación con el consumo de energía final total anual del modelo de referencia, para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).

En el caso de rehabilitar la totalidad de la envolvente térmica, independientemente del sistema constructivo de cubierta (A-B-C), también se consigue un cierto ahorro energético respecto al modelo de referencia en todas las ciudades, excepto en el caso de Las Palmas de Gran Canaria. Esta ciudad está situada en una zona climática (ZC  $\alpha$ ) con temperaturas moderadas que se mantienen relativamente estables a lo largo del año. Se puede observar en la Tabla 7.4 como las temperaturas medias anuales por horas se sitúan entre los 19,1 °C y los 23,3 °C. De acuerdo con la normativa vigente, la temperatura de confort en el interior de una vivienda se sitúa entre los 21-23 °C en invierno y 23-25 °C en verano (véase apartado 2.2.4.2). En esta ciudad, la temperatura ambiente se mantiene más cercana a la temperatura de confort interior o dentro del rango, sin tantas oscilaciones térmicas anuales ni diarias. En el modelo de referencia, sin aislamiento térmico en la envolvente, menor inercia y mayores filtraciones de aire (debido al sistema constructivo) se obtiene un menor consumo energético al aprovechar estas condiciones térmicas exteriores privilegiadas<sup>41</sup>.

41 Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., et al. 2022a.



AHORRO ENERGÉTICO (kWh)						
Ciudades	A-Env.	A-Cub.	B- Env.	B- Cub.	C- Env.	C- Cub.
Las Palmas de Gran Canaria	-1200,02	286,11	-1580,58	327,78	-1300,02	361,11
Almería	1313,91	936,12	963,9	994,46	1336,13	1119,46
Sevilla	2358,35	1311,12	2019,47	1347,23	2308,36	1419,46
Barcelona	2994,46	1422,23	2869,46	1550,01	2988,91	1533,34
Madrid	5577,83	1941,69	5502,83	2105,58	5627,83	2086,14
Burgos	9641,74	2338,91	9736,19	2572,24	9738,96	2511,13

Tabla 7.7. Ahorro energético (kWh) en relación con el consumo de energía final total anual del modelo de referencia, para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).

Por otro lado, la geometría y ubicación de la vivienda también influyen respecto a los datos obtenidos. En esta vivienda, las orientaciones principales son sur y oeste, siendo estas fachadas las que reciben mayor radiación solar en el hemisferio norte, además de ser las fachadas que disponen de mayor porcentaje de huecos en el modelo de referencia (Tabla 7.8).

	FACHADA NORTE	FACHADA SUR	FACHADA ESTE	FACHADA OESTE
Área total (m <sup>2</sup> )	27,55	27,55	26,07	26,07
Área de huecos (m <sup>2</sup> )	1,62	5,80	-	5,24
Proporción huecos (%)	5,88	21,05	-	20,10

Tabla 7.8. Área total (parte opaca + huecos), área de huecos (m<sup>2</sup>) y proporción de huecos (%) de las diferentes fachadas.

La mejora de la inercia de los sistemas constructivos tras la rehabilitación de toda la envolvente, añadiendo una capa de material aislante, produce un efecto de atenuación y desfase de la onda térmica. A través de la envolvente se produce una menor transmisión de calor, además de retrasar la entrada de calor al interior. Pero, la elevada radiación solar sobre las fachadas sur y oeste, al igual que sobre la cubierta, implica que, aunque atenuado y desfasado, se sigue transmitiendo una gran cantidad de calor al interior de los espacios. Se ha realizado un diseño de la ventilación de acuerdo con el mínimo exigido por normativa (véase Anexo III) y las filtraciones de aire desde el exterior se han disminuido gracias a la mejora de los sistemas constructivos. Esto produce que cuando la onda térmica llega al interior de los espacios los calienta, sin que se pueda disipar este calor mediante ventilación o filtraciones de aire. Un correcto diseño sostenible debe introducir elementos de control solar que reduzcan la incidencia directa del sol sobre la envolvente, especialmente en las orientaciones o elementos más expuestos. O bien plantear siempre un aumento de la ventilación asociado al aumento de la inercia, para disipar el calor que se pueda acumular en el interior de los espacios.

En épocas frías, con predominio del uso de sistemas de calefacción, el aumento de la ventilación supone la entrada de aire frío del exterior, así como la pérdida del calor producido en el interior de las estancias. Además, en este periodo las ganancias de calor en el interior, debido a la orientación, son positivas, reduciendo el consumo energético de calefacción respecto al modelo de referencia. En épocas frías, por lo tanto, la ventilación mínima exigida por la normativa es suficiente para conseguir ahorro energético y unas condiciones adecuadas de salubridad y confort térmico en el interior de la vivienda. En cambio, en épocas cálidas sí que es deseable un aumento de la ventilación, ya que en este periodo el calentamiento del interior de las estancias no es deseable al implicar un aumento del consumo de refrigeración para enfriar los espacios interiores. Concretamente, una mayor ventilación es deseable en las horas nocturnas, en las cuales no hay incidencia de la radiación solar sobre la envolvente, el calor acumulado por estos elementos a lo largo del día se transmite al interior (desfasado gracias al aumento de la inercia) y la temperatura ambiente desciende, situándose más cerca, o incluso por debajo de la temperatura de confort interior (en función de la ciudad y zona climática).

En el caso de Las Palmas de Gran Canaria, la radiación es elevada, situándose la máxima media anual en 662 W/m<sup>2</sup>. En este caso, las ganancias de calor en el interior debido a la orientación del edificio, el aumento de la inercia de la envolvente y la mínima ventilación aumentan considerablemente el consumo energético,





ya que el único mecanismo disponible para disipar el calor en el interior son los sistemas de refrigeración. Esto ocurre en todas las ubicaciones, por lo que, si se diseñaran elementos de control solar o se aumentara la ventilación, el ahorro energético al rehabilitar la totalidad de la envolvente sería mayor en todas las ubicaciones. Pero en el caso de Las Palmas de Gran Canaria, en que gran parte del día y el año la temperatura ambiente por sí sola se sitúa cerca o dentro del rango de temperatura de confort interior, esto resulta más perjudicial, aumentando el consumo energético total tras rehabilitar toda la envolvente.

A pesar de que, como se ha comentado, en todas las ubicaciones se produce este problema, es menos patente o relevante en ciudades con menor radiación solar y, especialmente, con menor importancia del consumo energético de refrigeración respecto al consumo energético total. Cabe destacar en este punto que el consumo energético de la vivienda considera la suma de los equipos eléctricos, iluminación y sistemas de climatización (calefacción y refrigeración). La fuente de energía de la vivienda es, en este caso, eléctrica. En todas las ubicaciones, los consumos eléctricos de los equipos e iluminación son los mismos, al igual que la temperatura de consigna de los sistemas de climatización (véase Anexo III), modificándose únicamente el consumo de los sistemas de calefacción y refrigeración en función de las necesidades de cada tipo de clima. Por lo tanto, en climas más fríos, como Burgos (ZC E) o Madrid (ZC D), el consumo de refrigeración anual en el modelo de referencia supone solo un 1,2 % y un 9,9 % del total, respectivamente. En climas más cálidos, el consumo de refrigeración aumenta, siendo la influencia de este respecto al consumo energético total del modelo de referencia del 19,8 % en Almería (ZC A), 22 % en Sevilla (ZC B) y 12,9 % en Barcelona (ZC C). Como se ha comentado, al rehabilitar toda la envolvente y mejorar la inercia de los sistemas constructivos se aumenta, en este caso, el consumo energético de refrigeración. En climas cálidos el aumento de este consumo, ya elevado en el modelo de referencia, implica alcanzar un ahorro energético total más discreto. Mientras, en climas más fríos el aumento del consumo de refrigeración no resulta tan relevante, ya que este era menor al 10 % del total en el modelo de referencia. Pero, además, las ganancias de calor acumuladas en el interior tienen un efecto positivo en climas fríos donde el mayor consumo se debe a los sistemas de calefacción. Un aumento de las ganancias de calor en el interior reduce este consumo, que en el modelo de referencia suponía el 77,2 % del consumo total en Burgos y el 61,9 % en Madrid.

Desde el punto de vista del ahorro energético obtenido en función del sistema constructivo, los sistemas de cubierta ajardinada extensiva (B) e intensiva (C) consiguen mayores reducciones del consumo energético anual que el modelo de cubierta tradicional con acabado de grava (A). Tal y como se observa en la figura 7.9 y la tabla 7.7, esto ocurre en todas las ciudades y con el supuesto de rehabilitar únicamente la cubierta. Además, en climas cálidos (Las Palmas de Gran Canaria, Almería, Sevilla y Barcelona), el modelo C presenta un ahorro similar o ligeramente superior (no más de un 13 %) al del modelo B. En cambio, el modelo B presenta un ahorro energético mayor al modelo C en climas más fríos (Burgos y Madrid). Esto se debe a una serie de factores de diseño de la cubierta ajardinada extensiva<sup>42</sup>:

- El sustrato presenta un menor espesor, por lo que almacena menor cantidad de agua disponible para la vegetación y para que se produzcan pérdidas de calor por evapotranspiración (principal mecanismo de disipación de calor en cubiertas ajardinadas).
- La vegetación es de poca altura (*sedum*) por lo que no existe entre la capa vegetal y el sustrato un colchón de aire en el cual el viento pueda introducirse y disipar el calor acumulado entre estas dos capas.
- La vegetación, al tratarse de especies suculentas *sedum*, no tiene un LAI elevado (LAI=0,8), por lo que la sombra producida sobre el sustrato será poco densa y la incidencia de la radiación solar sobre el propio sustrato será mayor.
- Este tipo de vegetación tiene la capacidad de regular la apertura de sus estomas y limitar las pérdidas de calor por evapotranspiración en la capa vegetal durante épocas de estrés hídrico, como es el caso del verano, momento en que es más necesario disipar el calor acumulado en estas capas exteriores de la cubierta ajardinada para evitar que se transmita al interior y aumente el consumo energético de refrigeración.

Todos estos factores justifican que, en ciudades como Almería, Sevilla o Barcelona, en las que el consumo de refrigeración es mayor, el modelo C consiga un ahorro energético mayor. Esto ocurre debido a la sombra más densa de su vegetación, la menor incidencia directa del sol sobre el sustrato y la mayor evapotrans-

42 Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., et al. 2022a.



piración en épocas cálidas. En cambio, en ciudades como Burgos o Madrid, donde predomina el consumo de calefacción, las ganancias de calor producidas en el modelo B, debido a sus particularidades, son beneficiosas.

La diferencia entre la reducción en el consumo energético obtenida al rehabilitar solo la cubierta y toda la envolvente también va aumentando conforme se analizan ciudades en climas más fríos y con mayores variaciones térmicas diarias y anuales. Por ejemplo, en Burgos, que además presenta la menor radiación solar máxima media anual de las seis ciudades (527 W/m<sup>2</sup>), la diferencia entre el ahorro de ambos casos de rehabilitación se sitúa entre los 7100-7300 kWh/año en los tres modelos (A-B-C). En el extremo opuesto, Almería, con un clima cálido, seco y con elevada radiación solar (729 W/m<sup>2</sup>) la diferencia entre el ahorro de ambos casos es menor, con valores entre 200-400 kWh/año para los modelos A y C, mientras que el modelo B presenta casi el mismo consumo en ambos supuestos de rehabilitación. Esto indica que, en relación con el ahorro energético anual, la influencia de la cubierta con respecto a la totalidad de la envolvente va variando en función del tipo de clima, es decir, de la temperatura ambiente y la radiación solar (Figura 7.10).

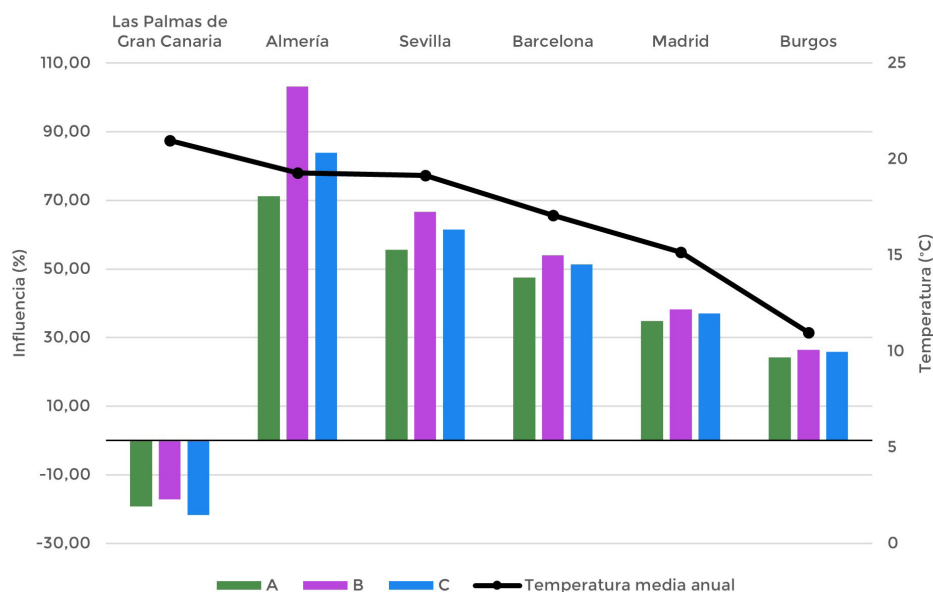


Figura 7.10. Influencia de la cubierta respecto al total de la envolvente (%) en relación con el ahorro energético obtenido tras rehabilitar en ambos supuestos, para cada sistema de cubierta (A-B-C). Temperatura media anual (°C) de las ciudades.

En la figura 7.10 se aprecia que la influencia que supone la rehabilitación de la cubierta en el ahorro energético al rehabilitar la totalidad de la envolvente describe un perfil similar a la temperatura media anual exterior en cada una de las ciudades. La influencia de la cubierta va decayendo desde Almería hasta Burgos de acuerdo con un descenso de la temperatura media anual. A menor temperatura ambiente se registra una menor influencia de la cubierta.

En el caso de Las Palmas de Gran Canaria, única ciudad con una temperatura media anual superior a los 20 °C, la influencia de la cubierta es negativa. Como se ha mencionado, en el caso de rehabilitar toda la envolvente, el consumo energético total anual es un -17,27 %, -18,71 % y -22,75 % más elevado en los modelos A, B y C, respectivamente, que en el modelo de referencia. En cambio, al rehabilitar solo la cubierta, se consigue un ahorro del 4,12 %, 4,72 % y 5,2 %, respectivamente. Por lo tanto, el incremento de energía que se produce entre la rehabilitación solo con cubierta y con toda la envolvente es del -21,39 % en el modelo A, -27,47 % en el modelo B y -23,91 % en el modelo C. Como se observa en la Tabla 7.9, en el resto de las ciudades la influencia de la cubierta es positiva y se mantienen, en la mayoría de los casos, por debajo del 100 %.

Los factores que explican este comportamiento responden a las particularidades de la cubierta como parte de la envolvente de un edificio. La cubierta, por su disposición (en este caso horizontal) recibe mayor cantidad de radiación solar incluso que la fachada orientada a sur. Mayor incidencia de la radiación solar supone alcanzar una mayor temperatura superficial en la cara exterior de la cubierta. Al aumentar la inercia térmica de este elemento, se atenúa la transmisión de las elevadas temperaturas superficiales exteriores



al interior del edificio. En climas cálidos con mayor temperatura ambiente, pero también mayores valores de radiación solar, la mejora de la inercia térmica de la cubierta supone un ahorro energético importante, presentando una influencia cercana o superior al 50 % respecto al ahorro obtenido al mejorar toda la envolvente. Es el caso de Almería (ZC A), Sevilla (ZC B) y Barcelona (ZC C).

AHORRO ENERGÉTICO (%)									
Ciudades	A-Env.	A-Cub.	A-Inf.	B- Env.	B- Cub.	B- Inf.	C- Env.	C- Cub.	C- Inf.
Las Palmas de Gran Canaria	-17,27	4,12	-19,26	-22,75	4,72	-17,18	-18,71	5,20	-21,75
Almería	12,42	8,85	71,26	9,11	9,40	103,18	12,63	10,59	83,85
Sevilla	19,47	10,83	55,62	16,67	11,12	66,71	19,06	11,72	61,49
Barcelona	23,97	11,39	47,52	22,97	12,41	54,03	23,93	12,27	51,27
Madrid	34,82	12,12	34,81	34,36	13,15	38,27	35,14	13,02	37,05
Burgos	46,00	11,16	24,26	46,45	12,27	26,42	46,47	11,98	25,78

Tabla 7.9. Porcentaje (%) de ahorro energético respecto al consumo de energía final anual del modelo de referencia para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.). En cada caso, se determina la influencia (Inf.) (%) respecto a toda la envolvente.

En cambio, en ciudades ubicadas en climas más fríos, independientemente de la radiación solar, el factor más determinante es la baja temperatura ambiente y la protección respecto a ella. Además, se trata de ciudades con mayor influencia del consumo energético de calefacción respecto al consumo total. En estos casos, es necesario que la mayor cantidad de metros cuadrados de la envolvente en contacto con el aire exterior se aislen correctamente para impedir los flujos de calor positivos de entrada de frío y los flujos de calor negativos que se producen por la salida del calor desde el interior calefactado, debido a la falta de inercia. En el caso de la vivienda modelada, la cubierta solo supone un 47 % de la superficie de la envolvente en contacto con el aire exterior. Por lo tanto, en ciudades como Burgos (ZC E) y Madrid (ZC D), la rehabilitación de la cubierta supone una influencia menor, por debajo del 50 %, ya que el consumo energético disminuye a mayor número de metros cuadrados de envolvente térmicamente rehabilitados.

Esta justificación también se puede emplear para analizar la reducción en el consumo energético obtenida en el caso de rehabilitar la totalidad de la envolvente en función del sistema constructivo de cubierta empleado. En climas cálidos se obtiene un ahorro energético muy similares con los modelos de cubierta con acabado de grava (A) y con la cubierta ajardinada intensiva (C), y mayores a los de la cubierta ajardinada extensiva (B). La mayor incidencia de la radiación solar en la superficie de la cubierta ajardinada extensiva, debido a las particularidades de la vegetación *sedum*, aumenta la temperatura superficial, la transferencia de calor al interior y, consecuentemente, el consumo energético de refrigeración. En el caso de ciudades en climas fríos, la disminución del consumo energético conseguida con los tres modelos es muy similar, ya que en este caso la cubierta no tiene un papel tan importante, siendo más relevante que la totalidad de la envolvente en contacto con el aire exterior se encuentre correctamente aislada.

Respecto a la relación entre sistema constructivo e influencia de la cubierta, se puede observar que el porcentaje de ahorro energético anual respecto al modelo de referencia tras rehabilitar la cubierta es muy similar en los tres modelos y en las seis ciudades (con valores aproximados entre el 9 % y el 13 %, a excepción de Las Palmas de Gran Canaria). Dentro de esta similitud, y teniendo en cuenta las conclusiones anteriores, se puede apreciar como en climas cálidos el ahorro es mayor en los modelos con cubierta ajardinada extensiva (B) e intensiva (C) que en el modelo sin ajardinar (A), destacando el ahorro en el modelo C. Mientras, en climas fríos, el ahorro es mayor en los modelos B y C, pero destaca el ahorro en el modelo con ajardinamiento extensivo (B).

Si se analiza el porcentaje de ahorro energético anual respecto al modelo de referencia al rehabilitar toda la envolvente ya se aprecia una mayor variabilidad entre ciudades (valores entre el 9 % y el 46 %). En climas cálidos, los modelos A y C presentan un comportamiento similar, mientras que el modelo B presenta un ahorro menor. En climas fríos, el modelo B presenta un mayor ahorro, llegando a superar a los modelos A y C en la ciudad de Burgos.



En el caso del modelo B (cubierta ajardinada extensiva), el menor ahorro al rehabilitar toda la envolvente (en la mayoría de las ciudades) y los porcentajes similares de ahorro respecto al resto de modelos en el caso de rehabilitar solo la cubierta, implican que la influencia de la cubierta respecto a la totalidad de la envolvente sea mayor, especialmente en climas cálidos. Esto mismo se puede observar en la figura 7.11.



Figura 7.11. Porcentaje (%) de ahorro energético respecto al consumo de energía final anual del modelo de referencia para el modelo B y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).

Como conclusión, cabe destacar cómo la influencia de la cubierta es menor en climas fríos. Esto es evidente ya que el ahorro que se consigue rehabilitando únicamente la cubierta es inferior a la mitad que en el caso de rehabilitar la totalidad de la envolvente. En cambio, en climas cálidos, esta influencia es mayor, con valores cercanos al 50 % o superiores. Es decir, en estas localizaciones, con la rehabilitación de la cubierta se consigue un ahorro energético igual o superior a la mitad del obtenido al rehabilitar toda la envolvente. Esto se produce, a pesar de que la superficie de cubierta es inferior al 50 % del área total de la envolvente en contacto con el aire exterior.

Por lo tanto, en las zonas climáticas A, B y C la opción de mejorar solo la transmitancia térmica de la cubierta puede ser viable y considerarse como solución adecuada a la hora de mejorar térmicamente la envolvente de un edificio. Obviamente, la opción ideal es mejorar constructivamente toda la envolvente del edificio, pero en el campo de la rehabilitación el coste de construcción puede convertirse en un factor decisivo a la hora de escoger la solución a realizar. En un edificio ubicado en un clima frío rehabilitar tan solo la cubierta no debería considerarse una opción factible, mientras que en un clima cálido se podría considerar como opción realizar una rehabilitación tan solo de la cubierta o una rehabilitación en varias fases, siendo la primera la cubierta y en fases posteriores mejorar térmicamente la envolvente, los sistemas de climatización, las luminarias, equipos eléctricos, etc.

En relación con el sistema constructivo, los tres modelos de cubierta presentan comportamientos energéticos muy similares. La cubierta ajardinada extensiva (B) tiene un mejor comportamiento en climas fríos con predominio del consumo energético de calefacción. Pero se debe considerar la importancia no solo de los beneficios económicos, sino también de los ambientales y sociales, por lo que los sistemas ajardinados son los más adecuados desde un punto de vista sostenible. Dentro de estos modelos de cubierta ajardinada, la instalación de un sistema de cubierta ajardinada intensiva (C) implica un mayor coste de construcción y peso propio, por lo que, teniendo en cuenta que el ahorro energético conseguido por los modelos B y C es muy similar (debido a las particularidades de ubicación, orientación y diseño de las cubiertas ajardinadas sin sistema de riego), el modelo B se presenta como la mejor de las opciones como sistema constructivo de rehabilitación de la cubierta.

Si se realizan cálculos aproximados del coste de construcción de ambas opciones de rehabilitación se puede observar cómo esta influencia de la cubierta es todavía más importante. Se toma como base para el cálculo el Módulo Básico de Edificación (MBE), publicado por el IVE, que se emplea como base para cal-



cular el coste de ejecución material por metro cuadrado (€/m<sup>2</sup>) de un edificio<sup>43</sup>. En este caso, se consulta el MBE para rehabilitación de una edificación residencial, vivienda unifamiliar aislada (el caso más similar a la vivienda unifamiliar adosada, pero del lado de la seguridad), con una altura menor o igual a 3 plantas, de menos de 20 viviendas de una superficie útil media de 70 m<sup>2</sup> y con un nivel medio de acabados. El MBE, considerando un nivel de intervención integral (el máximo posible) en la envolvente (cubiertas, fachadas y carpinterías exteriores), es de 154,81 €/m<sup>2</sup> para la fecha de consulta (julio 2022). En el caso de rehabilitar con un nivel de intervención integral únicamente la cubierta, el MBE es de 25,80 €/m<sup>2</sup>.

La vivienda modelada tiene una superficie de 77,2 m<sup>2</sup>, por lo que el coste de cada supuesto de rehabilitación sería, de acuerdo con el MBE, de:

- 11 951,33 € para la rehabilitación de toda la envolvente (cabe destacar que el MBE consultado no considera la mejora térmica de la solera, hecho que encarecería el coste de esta rehabilitación).
- 1991,76 € para la rehabilitación de la cubierta.

En la tabla 7.10 se muestra la equivalencia económica del ahorro energético conseguido en las diferentes ciudades para cada caso de rehabilitación. Para ello se multiplica la energía final ahorrada por el valor de la tarifa de la luz (€/kWh), aportada por Eurostat para el primer semestre de 2021 (últimos datos disponibles a fecha de consulta: julio 2022)<sup>44</sup>. Si se considera un consumo doméstico con valores anuales entre 5000-15 000 kWh, el valor de la tarifa, incluyendo impuestos y tasas, es de 0,1869 €/kWh.

AHORRO ECONÓMICO (€)						
Ciudades	A-Env.	A-Cub.	B- Env.	B- Cub.	C- Env.	C- Cub.
Las Palmas de Gran Canaria	-224,28	53,47	-295,41	61,26	-242,97	67,49
Almería	245,57	174,96	180,15	185,86	249,72	209,23
Sevilla	440,78	245,05	377,44	251,80	431,43	265,30
Barcelona	559,66	265,81	536,30	289,70	558,63	286,58
Madrid	1042,50	362,90	1028,48	393,53	1051,84	389,90
Burgos	1802,04	437,14	1819,69	480,75	1820,21	469,33

Tabla 7.10. Ahorro económico (€) en relación con el consumo de energía final total anual del modelo de referencia, para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).

En el caso de Almería (ZC A), Sevilla (ZC B) y Barcelona (ZC C), el ahorro económico conseguido al rehabilitar la cubierta es superior al 50 % respecto al obtenido al rehabilitar la totalidad de la envolvente. En cambio, el coste de construcción del supuesto de rehabilitar solo la cubierta es un 16,7 % del coste del supuesto de rehabilitación integral de la envolvente.

Por lo tanto, se considera el caso de rehabilitación solo de la cubierta como una opción energética y económicamente viable en las zonas climáticas más cálidas (A-B-C). En este caso, la ciudad de València, en la cual se van a llevar a cabo las simulaciones, se clasifica como zona climática B, por lo que queda justificado el análisis de los dos supuestos de rehabilitación: solo cubierta y toda la envolvente.

### 7.3.2 Comportamiento energético de las propuestas de rehabilitación

A continuación, se analiza el comportamiento energético de los diferentes casos simulados (véase apartado 7.2). Se estudia el caso de València, misma ciudad en la que se ubican las maquetas monitorizadas en el apartado 6, durante todo un año natural (2021). El clima mediterráneo de València está caracterizado por veranos cálidos, inviernos suaves, largos periodos sin precipitaciones y elevados valores de radiación solar global durante todo el año (Tabla 7.12), tal y como se ha observado también en el apartado 6.6. Aun así, la proximidad al mar, que funciona como regulador térmico, hace que a pesar de ser un clima cálido no tenga una elevada variación o amplitud térmica diaria (Tabla 7.11).

43 IVE. 2022b.

44 Eurostat. 2022.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
València	14,1	13,7	13,3	12,9	12,7	12,5	12,7	13,7	15,7	18,0	20,0	21,4	22,2	22,6	22,7	22,4	21,8	20,6	18,9	17,4	16,4	15,5	14,9	14,5

Se indican las casillas con menor temperatura con azul oscuro y las de mayor temperatura con rojo oscuro. La transición se marca con azules y rojos más claros.

Tabla 7.11. Temperatura media anual por horas (°C) de València.

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
València	0	0	0	0	0	1	19	114	285	483	630	706	735	738	725	649	498	288	107	17	1	0	0	0

Se indican las casillas con menor radiación solar en gris y las de mayor radiación solar con rojo oscuro. La transición se marca con rojos más claros.

Tabla 7.12. Radiación solar global media anual por horas (W/m<sup>2</sup>) de València.

En primer lugar, se comparará el modelo de referencia de vivienda unifamiliar adosada con los modelos A, B y C, rehabilitando únicamente la cubierta. En segundo lugar, se comparará el mismo modelo de referencia con los modelos A, B y C, pero rehabilitando toda la envolvente del edificio. Por último, se estudiarán los modelos de referencia entre 2 y 6 plantas, comparando su comportamiento con el modelo B de 2 a 6 plantas, rehabilitando solo la cubierta.

### 7.3.2.1 Caso de rehabilitación 1: mejora de la transmitancia térmica de la cubierta

En este caso, tan solo se mejora la transmitancia térmica de la cubierta, ya que el modelo de referencia presenta una transmitancia de 1,177 W/m<sup>2</sup>K, valor muy por encima al límite establecido por el CTE DB-HE en el anejo E para la zona climática B. Al realizar la rehabilitación con cada uno de los modelos, de acuerdo con los sistemas constructivos A (tradicional con acabado de grava), B (ajardinada extensiva) y C (ajardinada intensiva), la transmitancia de la cubierta baja, reduciéndose aproximadamente en una cuarta parte y quedando por debajo del límite. En la tabla 7.13 se puede observar la transmitancia térmica obtenida de acuerdo con las capas y espesores calculados en el Anexo I y empleados en el apartado 6.

En el caso del modelo A es muy similar la transmitancia obtenida en la simulación y la obtenida “manualmente” (véase Anexo I), con una diferencia del 3,6 %. Esta variación se puede deber a las resistencias de las capas superficiales de aire interior y exterior, ya que EnergyPlus no permite escoger un valor, sino el algoritmo en base al cual se van a calcular estos valores. En cambio, en los modelos ajardinados (B y C) las desviaciones ya son mayores, del 19,9 % y del 137,2 %, respectivamente. Esta variación se debe a la capa de sustrato y, especialmente, la de vegetación. La simplificación inicial para realizar cálculos manuales y poder comparar los 16 modelos de cubierta (véase Anexo I) no parece ser adecuada para realizar cálculos más detallados (*Transmitancia Anexo I* en la Tabla 7.13). De hecho, en la cubierta intensiva (C), con mayor espesor de sustrato y una capa de vegetación más densa esta desviación de los valores es mayor al 100 %.

Es por ello que este apartado con programas de simulación validados y de referencia es tan necesario. La dificultad de cálculo de los fenómenos de transmisión de calor en las capas de acabado de las cubiertas vegetales requiere del análisis con modelos informáticos para conocer un comportamiento de las cubiertas ajardinadas lo más parecido posible a la realidad.

De acuerdo con Zheng *et al.*<sup>45</sup> el valor de la transmitancia térmica de las cubiertas ajardinadas está continuamente cambiando en función de la variación del contenido de humedad del sustrato, debido al cambio de la conductividad y por los efectos de la evapotranspiración, por lo que hacer un cálculo manual exacto es muy complejo. Al tomar el modelo desarrollado por Sailor<sup>46</sup>, en base a las ecuaciones de Frankenstein y Koenig<sup>47</sup>, que es el empleado por el programa EnergyPlus para modelar el comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas, se obtienen unas nuevas transmitancias térmicas para los modelos B y C, más fiables.

45 Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.

46 Sailor, D.J. 2008.

47 Frankenstein, S., Koenig, G. 2004.



Además, se observa como el modelo B no cumple con el límite de transmitancia térmica establecido con el espesor de material aislante diseñado inicialmente (4,5 cm de XPS) (*Transmitancia inicial* en la Tabla 7.13). En este caso es necesario aumentar el espesor, alcanzando los 6,5 cm de XPS (*Transmitancia final* en la Tabla 7.13). Todas las simulaciones realizadas a partir de ahora se consideran con la cubierta ajardinada extensiva con 6,5 cm de material aislante.

U (W/m <sup>2</sup> K)					
	CTE DB-HE ZC B	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Transmitancia inicial	0,330	1,177*	0,307*	0,392*	0,306*
Transmitancia final	0,330	1,177*	0,307*	0,317*	0,306*
Transmitancia Anexo I	0,330	-	0,317	0,327	0,129

\* De los resultados obtenidos de EnergyPlus se toma el valor U-Factor with Film, ya este incluye las resistencias de las capas de aire superficiales interiores y exteriores.

Tabla 7.13. Transmitancia térmica ( $U=W/m^2K$ ) del modelo de referencia y modelos A, B y C, obtenidas por las simulaciones energéticas y de forma manual en el Anexo I.

### 7.3.2.1.1 Consumo de energía final

La variación en la transmitancia térmica de la cubierta antes y después de la rehabilitación con los modelos A, B y C, así como los resultados del apartado 7.3.1, ya indican que se producirá un consumo energético menor tras la rehabilitación con los tres modelos (Tabla 7.14).

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Iluminación	172,22	172,22	172,22	172,22
Equipos eléctricos	4347,26	4347,26	4347,26	4347,26
Refrigeración	2183,35	1622,24	1658,35	1425,01
Calefacción	5072,26	4466,70	4433,37	4561,15
<b>TOTAL</b>	<b>11 775,09</b>	<b>10 608,42</b>	<b>10 611,20</b>	<b>10 505,64</b>

Tabla 7.14. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia y los modelos A, B y C, propuestos para rehabilitación.

Estos valores se han comparado con un estudio realizado por IDAE en 2011<sup>48</sup>, en el cual se analizó el consumo energético en el sector residencial en España. De los valores característicos resumidos por la propia organización se observa que el consumo medio de una vivienda unifamiliar en la zona mediterránea es de 13 250 kWh/año (Tabla 7.15). Hay que tener en cuenta que este valor hace referencia a una vivienda unifamiliar, que de media en España tienen una superficie de 140 m<sup>2</sup> aproximadamente, pero tienen una mejor construcción ya que la mayoría de las viviendas unifamiliares han sido construidas en los últimos 30 años (solo un 33 % son de construcción previa a 1980). Se pueden tener en cuenta estos valores, ya que aunque nuestra vivienda tenga menor superficie (77,2 m<sup>2</sup>), la construcción no dispone de ningún aislamiento al ser de las décadas de 1950-1960, y haberse construido previamente de la entrada en vigor de la primera normativa que hizo referencia al aislamiento térmico en la envolvente de los edificios (NBE-CT-79, en vigor a partir de 1980). Por ello, se considera que el consumo obtenido al simular el modelo de referencia, de 11 775,09 kWh/año, se ajusta a la media española indicada en el informe del IDAE.

La tabla 7.14 resume, no solo el consumo de energía final total anual, sino también la parte correspondiente a la iluminación, los equipos eléctricos y los sistemas de climatización (refrigeración y calefacción). Se plantea una rehabilitación energética solamente centrada en la mejora de los sistemas constructivos, en este caso únicamente se mejora la transmitancia térmica de la cubierta. Por lo tanto, la iluminación y los equipos son los mismo en el modelo de referencia y en los modelos A, B y C. Siguen existiendo las mismas

48 IDAE. 2011.



cargas internas y los mismos horarios de uso, por lo que sus consumos no se modificaran, tras la rehabilitación, respecto al modelo de referencia. Los consumos energéticos de refrigeración y calefacción sí que varían, no solo tras la rehabilitación, sino entre los diferentes sistemas constructivos de cubierta: tradicional con acabado de grava (A), ajardinada extensiva (B) y ajardinada intensiva (C).

CONSUMO ENERGÉTICO MEDIO ANUAL (kWh/año)				
Tipo de vivienda	Zonas climáticas			España
	Atlántico Norte	Continental	Mediterránea	
Pisos	7306	9806	6139	7583
Unifamiliares	15 000	19 667	13 250	15 333
Viviendas	9278	12 611	8361	9917

Tabla 7.15. Consumo energético medio anual (kWh/año) por tipos de vivienda y zonas climáticas en España.

El máximo consumo energético de refrigeración se produce en la cubierta de referencia (Tabla 7.16). En los modelos A, B y C se introduce ya material aislante, además de las propias ventajas que implican el sustrato y la vegetación en los modelos ajardinados (B-C). Además, como se ha mencionado en el apartado 7.3.1, la ubicación de la cubierta hace que reciba gran cantidad de radiación solar y se alcancen en su superficie exterior elevadas temperaturas. El aumento de la inercia térmica de la cubierta, mediante la introducción de una capa de material aislante y la disminución de la transmitancia térmica, reducen la cantidad de calor que se transmite al interior a través de este elemento tan expuesto.

CONSUMO DE REFRIGERACIÓN ANUAL (kWh/año) Y AHORRO (%)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de refrigeración (kWh)	2183,35	1622,24	1658,35	1425,01
Ahorro respecto al modelo de ref. (%)	-	25,70	24,05	34,73
Ahorro respecto al modelo A (%)	-	-	-2,23	12,16
Ahorro respecto al modelo B (%)	-	2,18	-	14,07
Ahorro respecto al modelo C (%)	-	-13,84	-16,37	-

Tabla 7.16. Consumo de refrigeración anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).

Al comparar entre sí el consumo de refrigeración de los modelos A, B y C, quedan patentes ciertas variaciones. El mayor consumo del modelo B se puede deber a las particularidades de la vegetación. Se ha empleado una vegetación *sedum*, con un LAI de 0,8, por lo que la sombra sobre el sustrato será mucho menos densa que en el sistema de cubierta C, con una vegetación con gramíneas y LAI de 5. Además, la capa de vegetación *sedum* tiene un albedo de 0,22 (menor que el 0,3 de la vegetación del modelo C), por lo que refleja menor cantidad de radiación solar, absorbiendo una mayor proporción. De esta radiación absorbida una pequeña parte se empleará en realizar funciones metabólicas (5 %) y en la evapotranspiración (20 %), pero gran parte se transmitirá a capas inferiores, como el sustrato (véase apartado 3.1.2.2). Es decir, a menor albedo, mayor radiación solar absorbida y mayor transmisión de calor a las capas inferiores.

Además, el menor LAI genera una sombra menos densa sobre el sustrato, el cual, con un color oscuro, absorberá más calor que las gravas de color grisáceo claro del modelo A, como ya se ha observado en los datos de las maquetas. Estas circunstancias justifican que en la capa exterior de la cubierta ajardinada extensiva se alcancen mayores temperaturas superficiales exteriores, con lo que se puede explicar el mayor consumo en refrigeración en verano. Además, el *sedum* es una vegetación de poca altura y que crece de forma tapizante, es decir, no deja espacio entre la planta y el sustrato, impidiendo que se genere una capa de aire o colchón entre la vegetación y el sustrato. Si existiera esta capa de aire sería más fácil que el viento se introdujera en ella y disipara el calor acumulado entre vegetación y sustrato, por lo que esto también favorece el aumento de la temperatura superficial del sustrato y el mayor consumo.

Otro factor importante es que ciertas plantas suculentas, como es el caso del *sedum*, permiten regular la apertura de sus estomas, por lo que, en épocas de estrés hídrico, como es el caso del verano en València





(véase tabla II.1), con escasas lluvias, reducen la apertura de los estomas y el intercambio de agua con el ambiente. Se trata de especies que almacenan agua en su interior, la cual aprovechan en épocas de escasez de agua, por lo que regular la apertura de los estomas les permiten sobrevivir en condiciones más extremas (sequía, elevada exposición solar, sustratos de poco espesor y con poca capacidad de almacenamiento de agua, etc.), evitando la pérdida de agua y empleándola para desarrollar funciones vitales. Pero esta limitación en la apertura de los estomas reduce la disipación de calor por evapotranspiración. Parte de la radiación solar absorbida por la vegetación se disipa por medio de la evapotranspiración, como se ha mencionado. Pero en este caso, que se reduce y limita este proceso, más radiación solar absorbida significa un aumento de la temperatura de las hojas y del calor transmitido a capas inferiores.

Estos datos coinciden con los datos de temperatura registrada por las diferentes sondas (véase figura 6.54, apartado 6.6.2). Las temperaturas superficiales de los modelos A y C (sondas A4 y C5) son muy similares, mientras que en el caso del modelo B, la sonda B4 registra límites superiores e inferiores más altos que los dos modelos anteriores.

En el modelo C se emplea una vegetación de gramíneas de tallo alto, con un LAI de 5 y un albedo de 0,3, además de presentar una capa de sustrato de 60 cm, que aporta mayor inercia térmica al sistema de cubierta y tienen mayor capacidad de almacenamiento de agua. La superficie exterior de la cubierta del modelo C se mantendrá a menor temperatura debido al elevado LAI, que reduce la radiación que llega al sustrato, y a un mayor albedo, que reduce la radiación absorbida por la capa vegetal. Además, al tratarse de vegetación de tallo alto, se genera una capa de aire entre las hojas y el sustrato en la cual el viento podrá introducirse y disipar parte del calor acumulado en este espacio, reduciendo la transmisión de calor por radiación de las hojas al sustrato.

Por otro lado, el mayor espesor del sustrato del modelo C permite almacenar mayor cantidad de agua, mientras que el tipo de vegetación gramínea no tiene la capacidad de limitar la apertura de sus estomas en épocas de estrés hídrico, por lo que mientras disponga de agua disipará calor por evapotranspiración. Cabe destacar que se está trabajando sobre cubiertas ajardinadas autosuficientes, por lo que la única agua disponible en el sustrato y la vegetación es aquella que el sustrato almacena tras los diferentes eventos lluviosos. En este caso, la limitación de agua disponible puede modificar el comportamiento energético de la cubierta ajardinada. Si hay poca agua disponible, se reducirá el fenómeno de evapotranspiración, principal mecanismo de disipación del calor en cubiertas ajardinadas, por lo que su comportamiento térmico y energético no será el ideal (véase apartado 7.3.3). A pesar de tratarse de una cubierta autosuficiente, la mayor inercia del sustrato, mayor capacidad de almacenamiento de agua y las características de la vegetación explican que el menor consumo energético de refrigeración se produzca en el modelo C.

Cabe considerar que el mayor espesor del sustrato (60 cm) y el consiguiente aumento de la inercia térmica producen un efecto no deseado en verano. Esta inercia ayuda a limitar la entrada de calor desde el exterior, pero también a que el calor acumulado durante el día en el interior de la vivienda pueda disiparse en momentos en los que se reduce la temperatura ambiente y la radiación solar es baja o nula, es decir, durante la noche. Estos flujos de calor negativos son una herramienta de enfriamiento muy apreciada en climas de veranos cálidos como el de la ciudad de València, tal y como se ha visto en el análisis de un día cálido representativo, con temperatura elevadas incluso en horas nocturnas (véase apartado 6.6.2.1). Por eso, una elevada inercia térmica de la envolvente siempre debe ir acompañada de una buena y suficiente ventilación, porque si no el calor se queda acumulado en el interior y la única manera de disiparlo es aumentando el consumo de refrigeración.

En el caso del consumo de energía de calefacción ocurre a la inversa y la justificación se puede basar en los mismos puntos presentados previamente. Se produce un ahorro evidente al añadir a la cubierta una capa de material aislante y/o una capa de sustrato y vegetación. Se puede observar, al igual que en el caso de la refrigeración, que al añadir una capa de un material aislante térmico se limitan y minimizan las transmisiones de calor a las capas interiores de la cubierta (Tabla 7.17). En épocas cálidas se limita la entrada de calor, manteniendo más fría la superficie interior de la cubierta y, por lo tanto, reduciendo el consumo de refrigeración para mantener el interior a la temperatura de consigna (25 °C). En épocas frías, esta capa aislante limita la entrada de frío del exterior, manteniendo la temperatura de la superficie interior de la cubierta más



elevada, con menores oscilaciones térmicas y limitando el consumo de calefacción para mantener el interior a la temperatura de consigna (21 °C).

CONSUMO DE CALEFACCIÓN ANUAL (kWh/año) Y AHORRO (%)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de calefacción (kWh)	5072,26	4466,70	4433,37	4561,15
Ahorro respecto al modelo de ref. (%)	-	11,94	12,60	10,08
Ahorro respecto al modelo A (%)	-	-	0,75	-2,11
Ahorro respecto al modelo B (%)	-	-0,75	-	-2,88
Ahorro respecto al modelo C (%)	-	2,07	2,80	-

Tabla 7.17. Consumo de calefacción anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).

En el caso de la cubierta ajardinada extensiva (B), se registra el menor consumo de calefacción. Esto se debe a las mismas variables que, en el caso de refrigeración, mantenían más elevada la temperatura de la superficie exterior del sustrato:

- LAI bajo de la vegetación (LAI=0,8), lo que provoca una sombra poco densa sobre el sustrato.
- Albedo más bajo (0,22), que implica una menor reflexión de la radiación solar incidente y una mayor absorción por parte de la vegetación, aumentando su temperatura y el calor que se transmite al sustrato.
- Poca altura de la vegetación y escaso espesor de la capa de aire entre la vegetación y el sustrato, impidiendo que se disipe el calor y que el aire de esta capa se reemplace fácilmente por aire exterior, más frío en invierno.

En el caso del modelo A, el consumo energético de calefacción es muy similar, menos de un 1 % superior, al consumo del modelo B. Esto se debe a que la evapotranspiración producida en épocas frías permite disipar el calor acumulado en la superficie de la cubierta debido a la elevada radiación solar producida en València durante todo el año. Esto, sumado a la temperatura ambiente más baja de estas épocas, supone una temperatura superficial de la cubierta más baja, una temperatura de la superficie interior también más baja y un mayor consumo energético de calefacción. Aun así, el mayor albedo del sustrato, el estado de la vegetación (véase apartado 6.5) y las escasas lluvias en el periodo de invierno aseguran un menor consumo de calefacción en el modelo B que en el modelo A, con acabado de gravas claro y sin mecanismos de evapotranspiración.

El comportamiento del modelo C corrobora estas conclusiones. El consumo de calefacción es el mayor de los tres modelos, ya que el LAI es mayor que en el modelo B (LAI=5), por lo que la sombra es más densa y llega menos radiación solar a la superficie del sustrato. Por otro lado, el albedo es mayor (0,3) que en la vegetación tipo suculenta, por lo que, al reflejar mayor radiación solar, la vegetación absorbe menos y también se disminuye la transmisión a capas inferiores. Con esto ya se puede suponer que la temperatura superficial exterior del sustrato en el modelo C será menor que en el modelo B. Además, una mayor altura de la vegetación implica una capa de aire entre vegetación y sustrato de mayor espesor donde el aire exterior, a menor temperatura, puede sustituir el existente, enfriando la superficie del sustrato.

La limitación de los flujos de calor negativos debido a la inercia térmica del sustrato y el material aislante, no son deseables en épocas cálidas, pero sí que son beneficiosos durante el invierno, cuando la temperatura ambiente del aire es menor que la temperatura de confort interior. En épocas frías interesa impedir que el calor del interior calefactado pueda salir hacia el exterior.

A partir de todos los datos aportados se observa que el mayor ahorro energético respecto al modelo de referencia se produce en refrigeración, destacando el de la cubierta C (aproximadamente un 35 %). Las investigaciones de Santamouris *et al.*<sup>49</sup> obtuvieron un ahorro energético en refrigeración entre el 15 % y el 49 % al instalar una cubierta ajardinada sobre un sistema sin aislamiento previo. Los valores de los modelos B y C se encuentran dentro de este margen, siendo del 24,05 % y del 34,73 %, respectivamente.

49 Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., *et al.* 2007.



En el caso de la reducción del consumo energético de calefacción, esta es más discreta y se debe principalmente al poder del material aislante y a la inercia térmica del sustrato. Aun así, el sistema ajardinado de la cubierta B muestra un mejor comportamiento, con un ahorro energético anual respecto al modelo de referencia del 12,60 % en calefacción.

En relación con el total de energía final anual, el mejor comportamiento es el de la cubierta ajardinada intensiva (modelo C), reduciendo el consumo respecto al modelo de referencia en 1269,45 kWh/año (10,78 %) y respecto al modelo tradicional con acabado de grava (A) en 102,78 kWh/año (0,97 %). Cabe destacar que el ahorro energético total de la cubierta extensiva (modelo B) respecto al modelo de referencia es muy similar al del modelo C, de un 9,88 % (Tabla 7.18). Al instalar un sistema ajardinado sobre una cubierta correctamente aislada la capacidad de ahorro energético de las cubiertas ajardinadas se ve muy limitado. En este caso, el ahorro total anual de los modelos B y C respecto al modelo A no llega a ser del 1 %. De acuerdo con Berardi<sup>50</sup>, la reducción del consumo energético total al estudiar cubiertas ajardinadas instaladas sobre cubiertas con aislamiento previo se situaba entre el 1,8 % y el 2,9 %. De entre estos valores, el mayor ahorro se debía a cubiertas con mayor espesor de sustrato y del LAI de la vegetación, al igual que en el caso actual, en el cual el mayor ahorro se produce en el modelo C. Cabe recordar que la limitación de agua disponible debido a que se trata de cubiertas autosuficientes modifica el poder de ahorro de los sistemas ajardinados.

CONSUMO TOTAL ANUAL (kWh/año) Y AHORRO (%)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo total (kWh)	11 775,09	10 608,42	10 611,20	10 505,64
Ahorro respecto al modelo de ref. (%)	-	9,91	9,88	10,78
Ahorro respecto al modelo A (%)	-	-	-0,03	0,97
Ahorro respecto al modelo B (%)	-	0,03	-	0,99
Ahorro respecto al modelo C (%)	-	-0,97	-1,00	-

Tabla 7.18. Consumo total anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).

Tal y como se indica en la tabla 7.19 el consumo de calefacción implica un porcentaje mayor sobre el consumo total (entorno al 40 %), aunque el consumo de refrigeración muestra valores propios de un clima cálido (véase apartado 7.3.1). Las filtraciones, junto a la ventilación y la baja inercia térmica de las fachadas, ayudaran en verano a disipar el calor acumulado en el interior. Tras la rehabilitación, estos factores, sumados a la mejora de la inercia térmica de la cubierta, limitando la entrada de calor a través de este elemento de la envolvente tan expuesto, hacen que el consumo de refrigeración disminuya. En invierno las filtraciones, la ventilación y la escasa inercia de las fachadas favorecen la entrada de frío desde el exterior y la salida de calor desde el interior calefactado. Esto producirá un enfriamiento del interior. Aun así, el consumo de calefacción disminuye ligeramente debido, principalmente, a la orientación de la vivienda, siendo las fachadas principales sur y oeste, y a la elevada radiación solar que reciben.

CONSUMO ENERGÉTICO FINAL SOBRE EL TOTAL (%)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Iluminación	1,47	1,63	1,63	1,65
Calefacción	43,07	42,10	41,77	43,41
Refrigeración	18,54	15,29	15,63	13,57
Equipos eléctricos	36,92	40,98	40,97	41,37

Tabla 7.19. Porcentaje (%) representado por cada tipo de consumo sobre el consumo energético final anual en los modelos de referencia, A, B y C tras rehabilitar solo la cubierta.

50 Berardi, U. 2016.



### 7.3.2.1.2 Análisis del consumo de energía primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub>

De acuerdo con el CTE DB-HE, se limita el consumo de energía primaria total y de fuentes no renovables. En este caso, la única fuente de energía de la vivienda es la electricidad, que no se especifica si proviene de recursos renovables o no renovables. Por lo tanto, a partir del consumo de energía final anual total de la vivienda se obtendrá el consumo de energía primaria total anual, que se podrá comparar con los datos límite establecidos en la normativa.

Para el cálculo de la energía primaria a partir del valor de la energía final se emplearán los coeficientes de paso, de acuerdo con el tipo de fuente de energía primaria y la ubicación geográfica<sup>51</sup>. En este caso se toma el coeficiente para energía primaria total, aunque existen también coeficientes solo para energía primaria renovable o no renovable, y para el caso de electricidad convencional peninsular. El valor de este coeficiente será de 2,368. En la tabla 7.20 se indica el consumo total de energía final y primaria de cada uno de los modelos, así como el consumo de energía primaria por m<sup>2</sup> que emplearemos para comparar con el límite establecido por el CTE DB-HE para la zona climática B en el caso de reformas: 80 kWh/m<sup>2</sup> año.

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de energía final	11 775,09	10 608,42	10 611,20	10 505,64
Consumo de energía primaria total	27 883,41	25 120,74	25 127,32	24 877,36
Consumo de energía primaria total por m <sup>2</sup>	361,18	325,40	325,48	322,25

Tabla 7.20. Consumo anual de energía final y primaria total (kWh/año), y consumo anual de energía primaria total por m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup> año).

Como queda reflejado, se supera con creces el límite establecido por la normativa. En el caso de emplear electricidad solo procedente de fuentes renovables, el coeficiente disminuye a 0,414. Por lo tanto, para alcanzar valores de energía primaria menores al límite establecido por la normativa se debería emplear un mayor porcentaje de fuentes renovables en la producción de electricidad, como por ejemplo con la instalación de placas solares que autoabastezcan la vivienda. Este supuesto se recoge en la tabla 7.21, en la cual se ha aplicado el coeficiente de electricidad convencional peninsular de fuentes renovables (0,414), observando una clara disminución en el consumo de energía total primaria. En este caso, el consumo de energía primaria por m<sup>2</sup> queda por debajo del límite indicado en el CTE DB-HE para la zona climática B.

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de energía final	11 775,09	10 608,42	10 611,20	10 505,64
Consumo de energía primaria renovable	4874,89	4391,89	4393,04	4349,33
Consumo de energía primaria renovable por m <sup>2</sup>	63,15	56,89	56,90	56,34

Tabla 7.21. Consumo anual de energía final y primaria renovable (kWh/año), y consumo anual de energía primaria renovable por m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup> año).

Como conclusión, la simple mejora del sistema constructivo de cubierta, aunque implique una reducción en el consumo energético, mayor en el caso de emplear además soluciones sostenibles como las cubiertas ajardinadas, no es suficiente para conseguir cumplir con los límites establecidos en la normativa actual. Es necesario, por lo tanto, plantear otras opciones, como la mejora térmica de toda la envolvente del edificio o el empleo de fuentes de energía renovables, como por ejemplo con la instalación de paneles solares, cuyo rendimiento es mayor en combinación con cubiertas ajardinadas (véase apartado 4.5.1). Otra posible solución para disminuir el consumo de energía de la vivienda es la instalación, tal como se está imponiendo actualmente en edificaciones en el clima mediterráneo, de un sistema de aerotermia. Este sistema, mediante un pequeño aporte de energía eléctrica, consigue acondicionar el aire interior de la vivienda o calentar el agua corriente aprovechando en gran parte la energía extraída del aire exterior.

51 IDAE. 2014.



Los valores de consumo anual de energía final también se pueden traducir en kilogramos equivalentes de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>), para conocer las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas del consumo energético anual de la vivienda en funcionamiento (Tabla 7.22). Para ello empleamos el coeficiente de paso de emisiones de CO<sub>2</sub> para electricidad convencional peninsular: 0,331. Al igual que en el caso anterior depende de la fuente de energía primaria y de la ubicación geográfica.

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año) Y EMISIONES DE CO <sub>2</sub> ANUALES (kg CO <sub>2</sub> )				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de energía final anual	11 775,09	10 608,42	10 611,20	10 505,64
Emisiones de CO <sub>2</sub> anuales	3897,55	3511,39	3512,31	3477,37

Tabla 7.22. Consumo anual de energía final (kWh/año) y emisiones de CO<sub>2</sub> anuales producidas por el edificio de acuerdo con este consumo (kg CO<sub>2</sub>).

Cabe destacar que, en el caso de que se emplee mayor proporción de fuentes de energía renovables en la producción de electricidad, estas emisiones de CO<sub>2</sub> se verán reducidas, así como al emplearse sistemas constructivos sostenibles como es el caso de las cubiertas ajardinadas. En futuras investigaciones se plantea abarcar el aspecto ambiental de las cubiertas ajardinadas, cuantificando los beneficios que supone su instalación, ya que en este estudio no se ha llegado a valorar aspectos ambientales o sociales, a veces difícilmente cuantificables. Es por ello que la reducción mencionada en las emisiones de CO<sub>2</sub> no se debe tomar como valor único, ya que se han enumerado toda una serie de ventajas ambientales que se deben considerar también en la elección de las cubiertas ajardinadas como soluciones constructivas que no solo mejoran la eficiencia del edificio (al conseguirse con ellas menores consumos energéticos anuales), sino también permiten revertir o mitigar problemas ambientales como el aumento de temperatura de las ciudades (efecto de isla de calor), el peligro de inundaciones debido a la escasez de superficies permeables o la falta de espacios naturales en la ciudad, y sus consecuencias para la biodiversidad o la salud de las personas<sup>52</sup>.

### 7.3.2.2 Caso de rehabilitación 2: mejora de la transmitancia térmica de toda la envolvente

Al igual que en el caso de mejora de la transmitancia térmica solo de la cubierta, las transmitancias de la mayoría de los elementos de la envolvente térmica del modelo de referencia son mayores que el valor límite establecido por el CTE DB-HE para la zona climática B. En la tabla 7.23 se detallan las transmitancias térmicas antes y después de la rehabilitación para todos los elementos de la envolvente, excepto el caso de la cubierta, para la cual los valores de la tabla 7.13 también se aplican en este apartado. Las mejoras introducidas en fachadas, solera, medianera y ventanas se han realizado por igual en los modelos A, B y C, ya que la única diferencia entre ellos se encuentra en el sistema de cubierta.

U (W/m <sup>2</sup> K)					
	Fachada	Solera	Medianera	Ventanas	Puerta de acceso
Transmitancia límite CTE DB-HE	0,380	0,690	0,750	2,000	5,700
Transmitancia modelo de referencia	2,079 <sup>1</sup>	2,838 <sup>1</sup>	1,571 <sup>1</sup>	5,689 <sup>2</sup>	4,200 <sup>3</sup>
Transmitancia modelos rehabilitados	0,360 <sup>1</sup>	0,621 <sup>1</sup>	0,636 <sup>1</sup>	0,999 <sup>2</sup>	4,200 <sup>3</sup>

<sup>1</sup> De los resultados obtenidos de EnergyPlus se toma el valor U-Factor with Film, ya este incluye las resistencias de las capas de aire superficiales interiores y exteriores.

<sup>2</sup> De los resultados obtenidos de EnergyPlus se toma el valor Glass U-Factor.

<sup>3</sup> De los resultados obtenidos de EnergyPlus se toma el valor U-Factor no Film.

Tabla 7.23. Transmitancia térmica (U=W/m<sup>2</sup>K) de los diferentes elementos de la envolvente térmica: valor límite por normativa, transmitancia del modelo de referencia y transmitancia en los modelos rehabilitados.

En el caso de la puerta exterior, cogiendo el valor de transmitancia térmica límite del CTE DB-HE, este es mayor que la transmitancia de la puerta diseñada para el modelo de referencia. Por lo tanto, se opta por



dejar la misma puerta exterior de acceso en el modelo de referencia y tras la rehabilitación. En el resto de los elementos de la envolvente se observa que la rehabilitación de los sistemas constructivos ha sido beneficiosa, reduciendo la transmitancia térmica y aumentando la inercia.

### 7.3.2.2.1 Consumo de energía final

La variación en la transmitancia térmica de la mayoría de los elementos de la envolvente térmica, así como los resultados del apartado 7.3.1, aproximan que se producirá un consumo energético menor tras la rehabilitación con los modelos A, B y C, en comparación con el modelo de referencia y con el caso de rehabilitación solo con cubierta (Tabla 7.24 y 7.25).

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Iluminación	172,22	172,22	172,22	172,22
Equipos eléctricos	4347,26	4347,26	4347,26	4347,26
Refrigeración	2183,35	3297,25	3375,03	2797,24
Calefacción	5072,26	1886,13	1858,35	1969,46
<b>TOTAL</b>	<b>11 775,09</b>	<b>9702,86</b>	<b>9752,86</b>	<b>9286,18</b>

Tabla 7.24. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia y los modelos A, B y C, propuestos para rehabilitación.

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)			
	Refrigeración	Calefacción	Total
Modelo de referencia	2183,35	5072,26	11 775,09
Modelo A_Cubierta	1622,24	4466,70	10 608,42
Modelo A_Envolvente	3297,25	1886,13	9702,86
Modelo B_Cubierta	1658,35	4433,37	10 611,20
Modelo B_Envolvente	3375,03	1858,35	9752,86
Modelo C_Cubierta	1425,01	4561,15	10 505,64
Modelo C_Envolvente	2797,24	1969,46	9286,18

Tabla 7.25. Comparación de los consumos energéticos anuales (kWh/año) totales, de refrigeración y de calefacción del modelo de referencia y los modelos A, B y C, tanto para la rehabilitación solo con cubierta como para toda la envolvente.

A la hora de comparar estos valores con el informe del IDAE<sup>53</sup> mencionado previamente, se debe tener en cuenta que los datos allí reflejados hacen referencia al parque de viviendas actual en España. Como ya hemos comentado, se trata de viviendas que en un porcentaje no despreciable están construidas con anterioridad a la primera norma que introducía conceptos de aislamiento en la envolvente del edificio (año 1980). Estos porcentajes son de un 33 % de las viviendas unifamiliares y un 49 % de los bloques de pisos. Debido a las diferencias en los consumos energéticos que pueda suponer las variaciones en los sistemas constructivos y su aislamiento, se ha optado por tomar como referencia el valor general de consumo en kWh/año para una vivienda (unifamiliar o piso) en España (con independencia de la zona climática) (Tabla 7.26). Los valores de consumo total anual conseguidos en los modelos A, B y C tras rehabilitar toda la envolvente son próximos y quedan por debajo de los 9917 kWh/año que se indica como valor medio de consumo general.

Se van a analizar los consumos energéticos de climatización y totales, como en el caso de rehabilitar únicamente la cubierta. En este caso se estudia en primer lugar el consumo energético de calefacción, ya que tiene un comportamiento más acorde a lo esperado. Este consumo baja significativamente en todos los modelos (A-B-C), tanto en relación con el modelo de referencia como en relación con el mismo modelo tan solo rehabilitando la cubierta. En esta última comparativa se puede apreciar que el ahorro en calefacción se

53 IDAE. 2011.



sitúa por encima del 55 %, y próximo al 60 % (Tabla 7.27). Este ahorro significativo (mayor al 50 %) se debe al hecho de que la totalidad de la envolvente en contacto con el aire exterior se encuentra muy bien aislada, por lo que el calor producido en el interior, tanto por las cargas internas de personas, iluminación y equipos eléctricos, como por los sistemas de calefacción, se mantiene en el interior. Al aumentar el aislamiento de la envolvente térmica y su inercia, al mismo tiempo que se reduce las filtraciones de aire (de 0,7 ACH a 0,1 ACH), la vivienda es capaz de mantener el calor producido, invirtiendo menor cantidad de energía para mantener la temperatura de consigna de calefacción durante las horas en que el sistema está activo.

CONSUMO ENERGÉTICO MEDIO ANUAL (kWh/año)				
Tipo de vivienda	Zonas climáticas			España
	Atlántico Norte	Continental	Mediterránea	
Pisos	7306	9806	6139	7583
Unifamiliares	15 000	19 667	13 250	15 333
Viviendas	9278	12 611	8361	9917

Tabla 7.26. Consumo energético medio (kWh/año) por tipos de vivienda y zonas climáticas en España.

	CONSUMO DE CALEFACCIÓN (kWh/año)	AHORRO RESPECTO AL CASO SOLO CUBIERTA (%)	AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
Modelo de referencia	5072,26	-	-
Modelo A_Cubierta	4466,70	-	11,94
Modelo A_Envolvente	1886,13	57,77	62,81
Modelo B_Cubierta	4433,37	-	12,60
Modelo B_Envolvente	1858,35	58,08	63,36
Modelo C_Cubierta	4561,15	-	10,08
Modelo C_Envolvente	1969,46	56,82	61,17

Tabla 7.27. Consumo de calefacción anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).

Cabe reseñar también la influencia que tiene la orientación de la vivienda en la obtención de estos resultados. Sus fachadas principales se encuentran orientadas a sur y oeste. En el hemisferio norte, después de la cubierta, la fachada sur es la que mayor incidencia de radiación solar recibe, seguida de las fachadas este y oeste, y por último la norte. En este caso, la fachada este es principalmente adiabática (medianera con la vivienda adosada). Teniendo en cuenta que la radiación solar en València es muy elevada, incluso en invierno (Tabla 7.12), el hecho de que dos de las principales fachadas de la vivienda estén orientadas a sur y oeste genera elevadas temperaturas en su superficie exterior. Además, estas dos fachadas son las que disponen de mayor proporción de huecos, con valores cercanos al 20 %, mientras que la fachada norte tan solo tiene un 6 %, aproximadamente (véase tabla 7.8). La elevada radiación en València y la orientación principal de las fachadas con mayor proporción de huecos ha influenciado en la elección de un vidrio doble con cámara, con control solar (para reducir la entrada de radiación) y bajo emisivo (para reducir la salida de calor producido en el interior durante el invierno) (véase Anexo III). Gracias al tratamiento de control solar se limita la cantidad de radiación que entra en la vivienda. Aun así, debido a la elevada radiación solar de la zona y la orientación, si no se dispone de ningún elemento de sombra o control solar, la cantidad de calor que entra por los huecos es muy elevada. Además, la temperatura que alcanza la superficie de la parte opaca de la fachada, tras recibir de forma directa la radiación solar también es muy elevada (Figura 7.12 y 7.13). En este caso, gracias a la mejora de la inercia de las fachadas, el calor acumulado en la superficie exterior se transmite al interior atenuado y desfasado en el tiempo, pero las ganancias en el interior siguen siendo elevadas como consecuencia de las elevadas temperaturas superficiales exteriores. Esta circunstancia resulta beneficiosa en invierno, ya que estas ganancias de calor, sumadas a la reducción de las filtraciones de aire, la elevada inercia de las fachadas y la baja ventilación, favorecen que no se disipe este calor, reduciendo el consumo energético de calefacción.

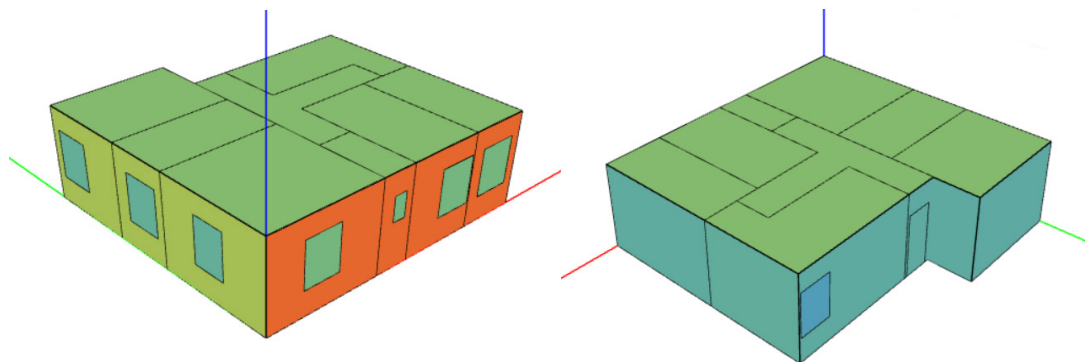


Figura 7.12. Temperaturas superficiales exteriores del modelo A, el día 6 de febrero a las 15:00 h: fachada sur 53,13 °C, fachada oeste 38,52 °C, fachada norte 22,32 °C y cubierta 30,76 °C. El eje verde indica el norte.

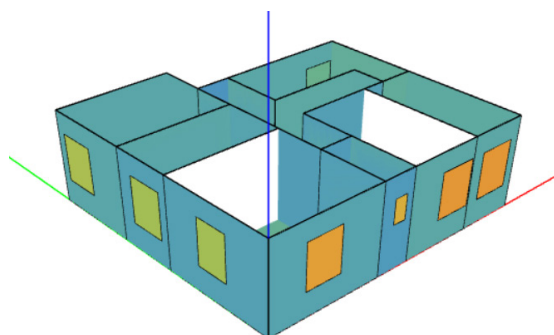


Figura 7.13. Temperaturas superficiales interiores del modelo A, el día 6 de febrero a las 15:00 h: ventanas de fachada sur 31,96 °C, ventanas de fachada oeste 28,69 °C y ventanas de fachada norte 23,77 °C\*. El eje verde indica el norte.

\* Las particiones interiores que aparecen en blanco es porque separan dos espacios que pertenecen a la misma zona térmica.

Para analizar este fenómeno debemos estudiar las temperaturas del aire de cada una de las zonas térmicas (ZT). En la tabla 7.28 se muestra un resumen de las diferentes zonas térmicas, los espacios que la componen, la orientación, la ventilación diseñada de acuerdo con la normativa (en renovaciones de aire por hora o ACH) y el color en el que se representan en la figura 7.14.

	ZONA TÉRMICA 1	ZONA TÉRMICA 2	ZONA TÉRMICA 3	ZONA TÉRMICA 4	ZONA TÉRMICA 5
Espacios	Salón-Estudio	Cocina	Baño	Dormitorios	Pasillo
Orientación	Sur-Oeste	Norte	Sur	Sur-Oeste	Norte
Ventilación (ACH)	1,55	1,90	7,82	0,85	-
Color	Naranja	Azul	Rojo oscuro	Verde oscuro	Verde claro

Tabla 7.28. Tabla resumen de las diferentes zonas térmicas.

Se consideran los datos de los días 6 a 9 de febrero. La temperatura del aire de todas las zonas climáticas se sitúa entre los 21 °C (temperatura de consigna de calefacción) y los 25 °C (temperatura de consigna de refrigeración) cuando los sistemas de climatización están encendidos. Hay que recordar, en primer lugar, que los sistemas de calefacción y climatización se encuentran en funcionamiento, de acuerdo con su horario, durante todo el año (véase Anexo III). En segundo lugar, los días 6 y 7 son fin de semana, por lo tanto, el horario de activación de los sistemas de climatización es de 07:00 h a 23:00 h, mientras que el 8 y 9 son lunes y martes, por lo que el horario de funcionamiento es de 06:00 h a 09:00 h y de 14:00 h a 23:00 h. El baño (**ZT 3**) es la zona térmica con menores temperaturas. Esto se debe a que, a pesar de la orientación de la fachada a sur, la ventana es de menores dimensiones y, sobre todo, al ser un espacio húmedo, le corresponde por normativa una mayor ventilación<sup>54</sup>, teniendo 7,82 ACH. Esto permite que el calor acumulado en el interior se disipe con mayor facilidad, enfriándose la estancia.

54 Ministerio de Fomento. 2022b.



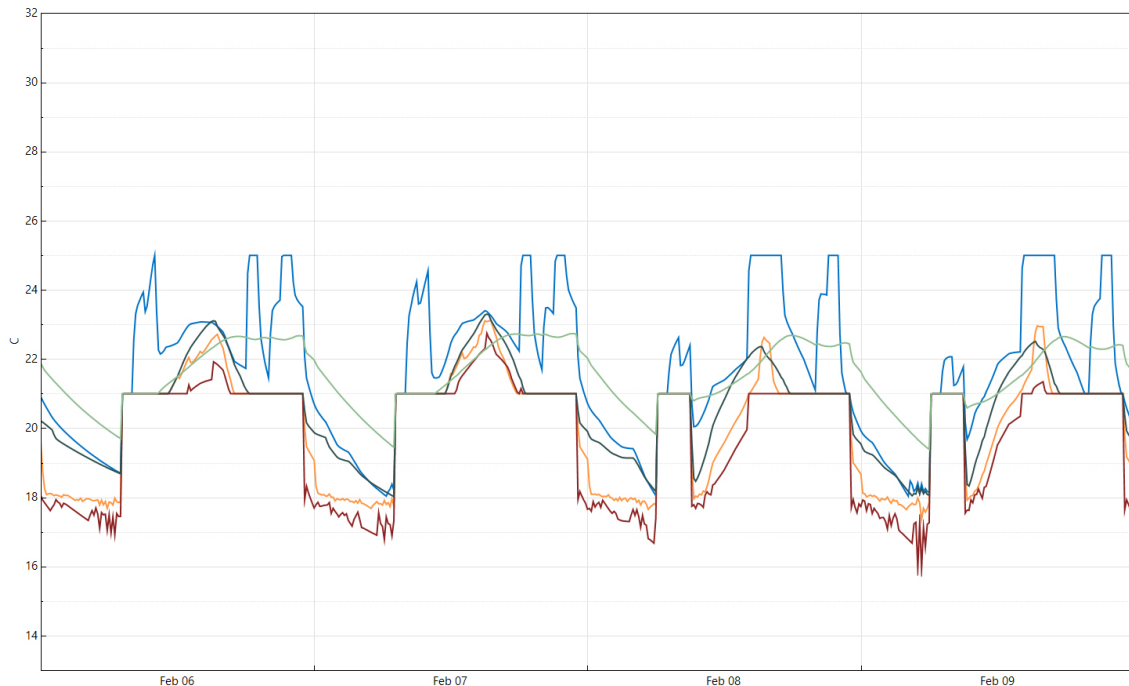


Figura 7.14. Temperatura del aire (°C) en cada una de las zonas térmicas del modelo A para el periodo del 6 al 9 de febrero. La leyenda de colores se encuentra en la tabla 7.28.

El pasillo (ZT 5), en cambio, presenta unas temperaturas superiores, pero con menores oscilaciones diarias, y menor variación entre los cuatro días estudiados. Esto se debe a que es un espacio sin ventanas al exterior y con poca cantidad de superficie en contacto con el exterior, siendo su única fachada orientada a norte, donde se ubica la puerta de acceso a la vivienda. Al ser su contacto con el exterior mínimo y no disponer de ventilación natural (que en invierno implica la entrada de aire frío del exterior) las temperaturas máximas son menores o similares al resto de espacios, mientras que las temperaturas mínimas son mayores a todas las zonas térmicas. Sus máximas temperaturas se obtienen desfasadas unas 3 horas del resto de zonas (exceptuando la cocina, ZT 2) ya que serán las estancias colindantes con el pasillo las que le transmitirán a través de las particiones interiores el calor al propio pasillo.

Respecto al salón y estudio (ZT 1) y los dormitorios (ZT 4), describen un comportamiento más o menos similar. En ninguna de las dos zonas térmicas se alcanzan los 25 °C. Aunque las temperaturas máximas se comportan más o menos similares en ambas zonas (ya que ambas tienen orientación sur y oeste), en las temperaturas mínimas el estudio y el salón presentan menores temperaturas en las horas nocturnas. Esto se debe a que por la noche los usuarios de la vivienda se encuentran en los dormitorios, por lo que la carga interna debida a la ocupación aumenta la temperatura interior de los dormitorios (ZT 4).

El caso de la cocina (ZT 2) merece una especial mención. A pesar de que su única fachada se encuentre orientada a norte (menor incidencia de la radiación solar), presenta las temperaturas máximas más elevadas, llegando a alcanzar los 25 °C. Se puede observar que los picos de máxima temperatura se alcanzan de 7:00-9:00 h, 14:00-17:00 h y 20:00-22:00 h, aproximadamente. Estos márgenes horarios coinciden con las horas de mayor uso de los equipos eléctricos de la cocina (Figura 7.15).

Al introducir los datos de estos equipos eléctricos en EnergyPlus y OpenStudio se les aplicó una fracción latente ( $F_{\text{latente}}$ ) de 0, una fracción radiante ( $F_{\text{radiante}}$ ) de 0,7 y una fracción perdida ( $F_{\text{perdida}}$ ) de 0 (véase Anexo III). Las ganancias de calor en un espacio ( $F_{\text{convectiva}}$ ), debido a los equipos eléctricos, se calculan, en el programa, de acuerdo con la siguiente ecuación:  $F_{\text{convectiva}} = 1 - (F_{\text{latente}} + F_{\text{radiante}} + F_{\text{perdida}})^{55}$ . Las ganancias convectivas ( $F_{\text{convectiva}}$ ) se suman directamente a la temperatura del aire del espacio, mientras que las radiantes son absorbidas por las diferentes superficies y luego se desprenden al aire del espacio. Por lo tanto, los valores introducidos implican que un 70 % de la energía de los equipos eléctricos se desprenderá y será absorbido por las superficies del espacio ( $F_{\text{radiante}}$ ), posteriormente desprendiéndose al aire y aumentando su temperatura.

55 Big Ladder software. 2022.



Mientras, el 30 % restante se transmitirá directamente al aire ( $F_{convectiva}$ ), ya que no hay fracción de energía perdida ni latente. Debido a la gran cantidad de equipos eléctricos de la cocina, el aporte calorífico de estos al aire de la estancia es muy elevado, hecho que explica las altas temperaturas, coincidiendo con momentos de uso de los equipos en este espacio.

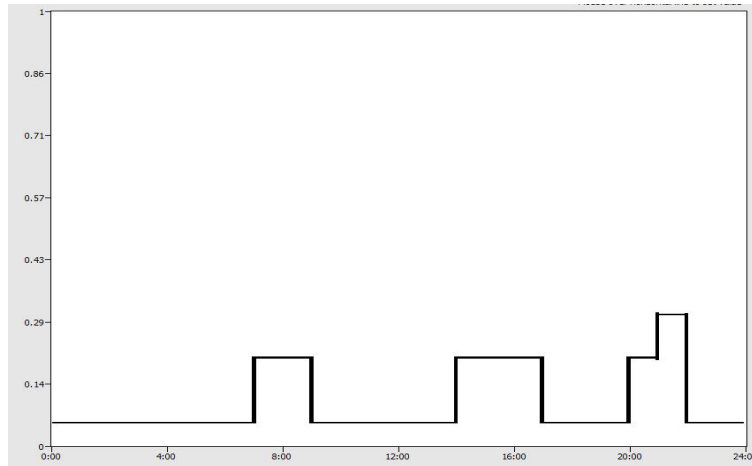


Figura 7.15. Horario de uso de equipos eléctricos en la cocina, para los días entresemana (L-M-X-J-V).

Si ampliamos el análisis y se consideran todos los días simulados (a lo largo de 2021), se observa que en ninguna zona térmica hay horas en las que se supere la temperatura de consigna de refrigeración ni de calefacción, incluso considerando las cargas internas de ocupación (Calefacción no satisfecha/Refrigeración no satisfecha), siempre y cuando estos sistemas hayan estado en funcionamiento (Tabla 7.29). La temperatura media anual más elevada es la de la cocina (ZT 2) con 24 °C, confirmando lo expuesto anteriormente. La mayoría de las horas la temperatura de esta zona térmica se sitúa entre 24,5 y 25,5 °C, aproximadamente (4213 horas de un total de 8760, un 48,1 %). De acuerdo con lo mencionado previamente el baño (ZT 3) presenta la menor temperatura media anual, con 21,8 °C.

HORAS PASADAS EN CADA RANGO DE TEMPERATURA (h)															
Zona	Calefacción no satisfecha	< 13,3	13,3-16,1	16,1-18,9	18,9-20,0	20,0-21,1	21,1-22,2	22,2-23,3	23,3-24,4	24,4-25,5	25,5-28,3	28,3-31,1	≥ 31,1	Refrigeración no satisfecha	Temperatura media (°C)
ZT 1	0	0	0	519	1101	656	2121	738	680	2610	331	4	0	0	22,3
ZT 2	0	0	0	12	585	512	888	688	659	4213	797	376	30	0	24,0
ZT 3	0	0	0	943	1091	611	2420	612	643	2273	167	0	0	0	21,8
ZT 4	0	0	0	30	896	664	2185	825	615	2797	737	11	0	0	22,9
ZT 5	0	0	0	0	202	679	1479	1204	897	3510	785	4	0	0	23,6

Se indican las casillas con mayor número de horas en color marrón, seguidos por el naranja y el amarillo en sentido decreciente del número de horas.

Tabla 7.29. Horas pasadas en cada rango de temperatura durante el año simulado y temperatura media anual (°C), para cada zona térmica (Tabla original obtenida del programa en el Anexo IV).

Respecto al consumo de refrigeración, el comportamiento ha sido diferente al que pudiera esperarse en un principio. El consumo energético de refrigeración no se ha reducido, sino que ha aumentado con valores de casi el doble, tanto respecto al modelo de referencia como respecto al caso de rehabilitación solo de la cubierta (Tabla 7.30).

Las causas de este aumento del consumo se pueden concluir a partir de los comentarios anteriores. La orientación principal de la vivienda es sur y oeste, siendo además estas fachadas las que tienen mayor proporción de huecos. El fenómeno de acumulación de calor en el interior de los espacios es deseable en periodos fríos, ya que reduce el consumo de calefacción, pero en periodos cálidos es negativo, ya que



aumenta considerablemente el consumo de refrigeración. Esto evidencia que plantear simplemente una rehabilitación de la envolvente térmica, mejorando su aislamiento térmico y su inercia, no es suficiente en todas las circunstancias. Aunque se obvian las particularidades de orientación de cada vivienda, simplemente aumentar la inercia de los elementos de la envolvente no consigue que una vivienda ubicada en València, con veranos cálidos, inviernos templados y elevada radiación solar todo el año, reduzca considerablemente su consumo energético total. Para ello, se deben considerar otras estrategias complementarias y medidas pasivas, como el diseño de elementos de protección solar, capaces de aportar sombra y proteger de la radiación, especialmente en verano cuando esta no es deseable, y permitir su entrada en la medida de lo posible en invierno; o el diseño de una mayor ventilación, especialmente en épocas cálidas y durante periodos nocturnos (en los cuales disminuye la temperatura ambiente y la radiación solar), para disipar el calor acumulado en el interior.

	CONSUMO DE REFRIGERACIÓN (kWh/año)	AHORRO RESPECTO AL CASO SOLO CUBIERTA (%)	AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
Modelo de referencia	2183,35	-	-
Modelo A_Cubierta	1622,24	-	25,70
Modelo A_Envolvente	3297,25	-103,25	-51,02
Modelo B_Cubierta	1658,35	-	24,05
Modelo B_Envolvente	3375,03	-103,52	-54,58
Modelo C_Cubierta	1425,01	-	34,73
Modelo C_Envolvente	2797,24	-96,30	-28,12

Tabla 7.30. Consumo de refrigeración anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).

Al aumentar la capa de material aislante de la envolvente térmica, especialmente en el caso de las fachadas, se consigue una menor transmisión de calor del exterior al interior. Se limitan los flujos positivos de entrada de calor desde el exterior en verano gracias al aumento del aislamiento del sistema constructivo. Pero, a pesar de reducir la transmisión de calor al interior, si la superficie exterior se mantiene a temperaturas muy elevadas, parte de este calor conseguirá entrar, aunque atenuado y desfasado en el tiempo. Si realizamos un proyecto con elementos de protección solar para reducir la incidencia solar, gran responsable del aumento de la temperatura superficial exterior (especialmente en la cubierta y las fachadas sur y oeste), se reducirá la temperatura superficial exterior. Como consecuencia también disminuirá la transmisión de calor al interior (gracias al aumento del aislante), las ganancias de calor en el interior y, con ello, se conseguirá una reducción del consumo energético de refrigeración y total. Otra posible solución es la sustitución del diseño actual por una fachada con cámara de aire ventilada donde se disipa el calor acumulado en la superficie del cerramiento. En las cubiertas ajardinadas la vegetación realiza las funciones de protección solar-sombra (mayor a mayor LAI) y de disipación del calor acumulado si existe una capa de aire entre la vegetación y el sustrato.

Este comportamiento se puede corroborar analizando las temperaturas superficiales de la fachada sur del salón. En la figura 7.16 se representa, para el periodo del 23 al 26 de julio, la temperatura del aire (amarillo), la temperatura superficial exterior (azul) y la temperatura superficial interior (rojo). La máxima temperatura superficial exterior de la fachada sur se produce el día 24, coincidiendo con el pico de temperatura ambiente (13:00 h). En cambio, la temperatura máxima de la superficie interior se encuentra desfasa aproximadamente 3 horas y media, produciéndose a las 16:30 h.

El efecto de los equipos eléctricos, explicado en el caso de calefacción se aplica también para refrigeración, pero en este caso aumentando su consumo. Se puede observar en la figura 7.17 como las superficies interiores de las fachadas, medianeras y particiones de la cocina, a pesar del sistema de climatización, son las que se encuentran a mayor temperatura. Esta diferencia con el resto de los espacios es más evidente en aquellas horas que coinciden con el horario de funcionamiento de los equipos eléctricos de la cocina, independientemente de la radiación solar exterior (día 24 de julio, a las 21:00 h).

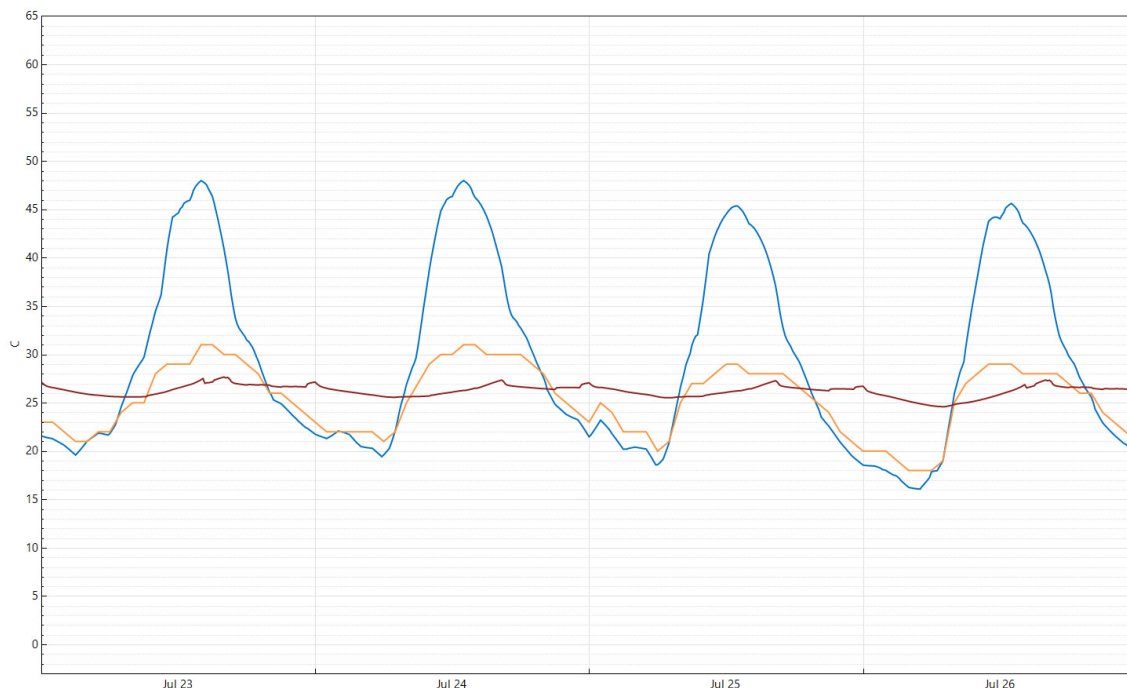


Figura 7.16. Temperaturas (°C) del aire (amarillo), superficial exterior (azul) y superficial interior (rojo) de la fachada sur del salón, para el periodo del 23 al 26 de julio.

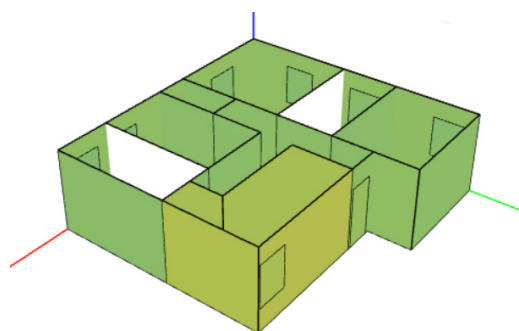


Figura 7.17. Temperaturas superficiales interiores del modelo A, el día 24 de julio a las 21:00 h: el color verde-amarillento indica temperaturas superiores a las de las superficies en color verde\*.

\* Las particiones interiores que aparecen en blanco es porque separan dos espacios que pertenecen a la misma zona térmica.

Por lo tanto, la mejora térmica de la envolvente no es suficiente, por si sola, para alcanzar la eficiencia energética, ya que se produce mucho ahorro en invierno, pero un excesivo gasto en verano. El ahorro energético comparando el consumo de energía final total con el caso de rehabilitación solo de la cubierta no alcanza el 9 % en los modelos A y B, mientras que en el modelo C se mantiene por debajo del 12 % (Tabla 7.31).

	CONSUMO TOTAL (kWh/año)	AHORRO RESPECTO AL CASO SOLO CUBIERTA (%)	AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
Modelo de referencia	11 775,09	-	-
Modelo A_Cubierta	10 608,42	-	9,91
Modelo A_Envolvente	9702,86	8,54	17,60
Modelo B_Cubierta	10 611,20	-	9,88
Modelo B_Envolvente	9752,86	8,09	17,17
Modelo C_Cubierta	10 505,64	-	10,78
Modelo C_Envolvente	9286,18	11,61	21,14

Tabla 7.31. Consumo total anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).



De los porcentajes indicados en la tabla 7.32, también se puede extraer un aumento de los consumos de refrigeración, mientras que el consumo de calefacción disminuye.

CONSUMO ENERGÉTICO FINAL SOBRE EL TOTAL (%)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Iluminación	1,47	1,78	1,77	1,86
Calefacción	43,07	19,44	19,06	21,20
Refrigeración	18,54	33,97	34,61	30,12
Equipos eléctricos	36,92	44,81	44,56	46,82

Tabla 7.32. Porcentaje (%) representado por cada tipo de consumo sobre el consumo energético final anual en los modelos de referencia, A, B y C tras rehabilitar toda la envoltura.

### 7.3.2.2 Temperaturas superficial de la cubierta

En este apartado se van a analizar las temperaturas superficiales de la cubierta en periodos preferentemente de refrigeración y de calefacción, por separado.

Para el estudio de las temperaturas superficiales interiores y exteriores en **época de calefacción**, se tomarán los datos referentes a los días 4 a 7 de enero (Figura 7.18). Este mes es de elevado consumo energético de calefacción para todos los modelos, junto a diciembre (el día frío característico estudiado en el apartado 6.6.2.2 era también en enero, el 18). Podemos observar que la mayor variación diaria en la temperatura ambiente (azul) se produce el día 4, con una diferencia entre la temperatura máxima y mínima de 15 °C. En este periodo de cuatro días, la máxima temperatura ambiente es de 20 °C y se produce el día 4 a las 14:00 h, mientras que la mínima es de 3 °C y se produce el día 6 a las 5:00 h y las 8:00 h. En la simulación realizada a lo largo de todo 2021 tan solo se han alcanzado, puntualmente, temperaturas menores a 0 °C (-1 °C alcanzados en el mes de febrero), por lo que no se trata de un año con heladas.

La radiación solar (amarillo) máxima alcanza un valor de 787 W/m<sup>2</sup> el día 4 de enero a las 13:30 h, media hora antes que el pico de temperatura máxima de ese mismo día. El resto de los días la radiación solar máxima alcanza valores un poco menores, pero siempre por encima de los 700 W/m<sup>2</sup>.

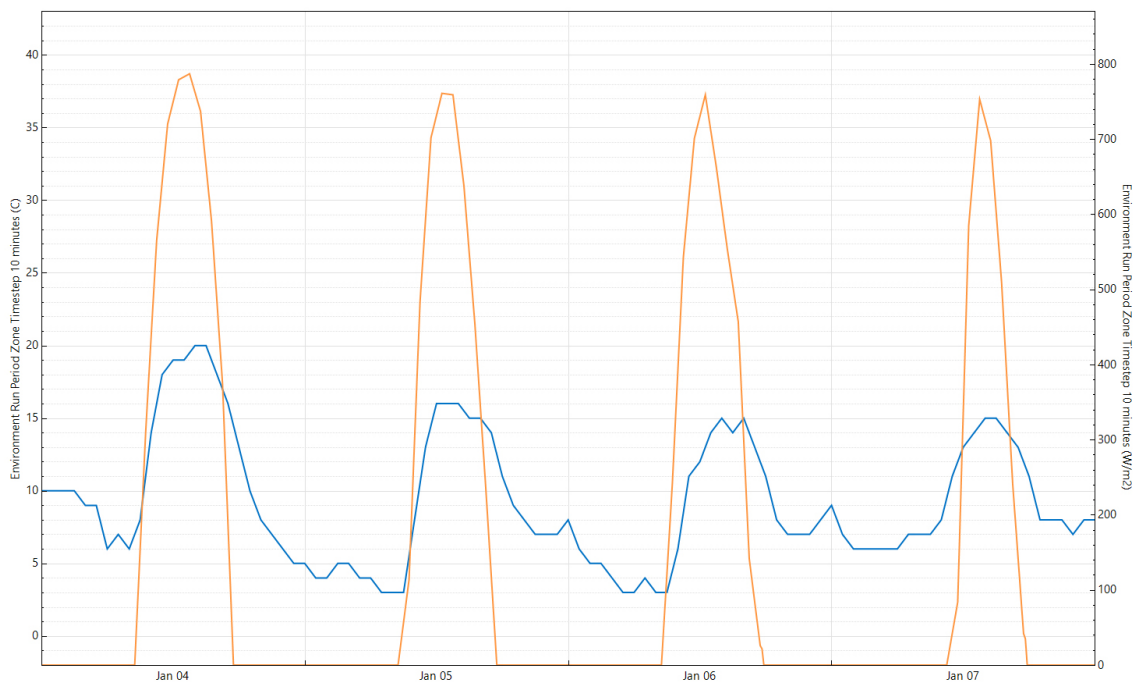


Figura 7.18. Condiciones ambientales durante los días 4 a 7 de enero: temperatura ambiente (°C) en azul y radiación solar (W/m<sup>2</sup>) en amarillo.



En estas condiciones ambientales, la cubierta del modelo de referencia (Figura 7.19) alcanza una temperatura máxima de la superficie exterior (amarillo) de 24,3 °C el día 4, 4,3 °C por encima de la temperatura ambiente (azul). Este máximo se alcanzó sobre las 14:30 h, 30 minutos después que la máxima temperatura ambiente. Ese día la variación térmica de la superficie exterior de la cubierta fue de 18,3 °C (3,3 °C más que la variación diaria de temperatura ambiente). La mínima temperatura superficial alcanzada en este periodo se registró el día 6, con 3,9 °C, a las 8:00 h. Coincide con el registro de la mínima temperatura ambiente, superando este valor en 0,9 °C.

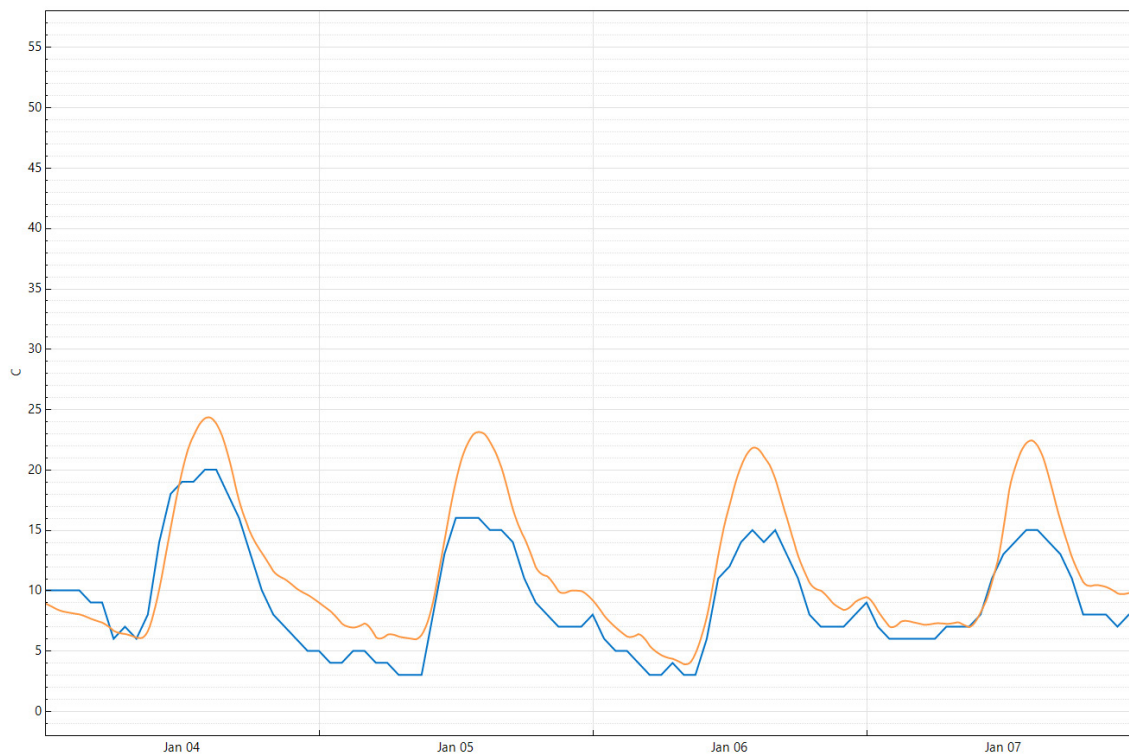


Figura 7.19. Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

En relación con la temperatura superficial interior de la cubierta (Figura 7.20), esta (amarillo) varía en este periodo entre los valores de 15,9 °C y 19,5 °C, produciéndose la máxima variación diaria el día 4, con 3,1 °C. Se debe considerar que el sistema de calefacción no está en funcionamiento siempre (Figura 7.21), por lo que se pueden apreciar alteraciones en la temperatura interior superficial, con aumentos bruscos de temperatura que coinciden con el encendido de la calefacción, mientras que durante la noche (con el sistema de calefacción apagado) se experimenta un descenso de la temperatura superficial interior. La máxima temperatura superficial en el interior se alcanza entorno a las 15:30 h, 1 hora y media después de alcanzarse la máxima temperatura ambiente (azul) y 1 hora después de alcanzarse la máxima temperatura en la superficie exterior de la cubierta.

En el caso de la cubierta del modelo A (Figura 7.22), la máxima temperatura de la superficie exterior (amarillo) se alcanza el día 4 y es de 24,3 °C, produciéndose a las 15:00 h, 1 hora después de la máxima temperatura ambiente (azul). Ese mismo día la variación térmica es de 20,7 °C (5,7 °C más que la variación de temperatura ambiente y 2,4 °C más que la variación térmica en la superficie exterior de la cubierta del modelo de referencia).

Respecto a la mínima temperatura superficial exterior en este periodo, se alcanza el día 6, con 0,3 °C a las 8:30 h de la mañana, media hora después de la mínima temperatura ambiente de ese día. Podemos observar que, especialmente las temperaturas mínimas, son más extremas que en el modelo de referencia, hecho que se traduce en una variación térmica diaria mayor. En relación con las temperaturas máximas alcanzadas en la superficie, estas son iguales o muy similares entre el modelo A y el de referencia, ya que los materiales diseñados tienen los mismos valores de absorción solar (véase Anexo III).

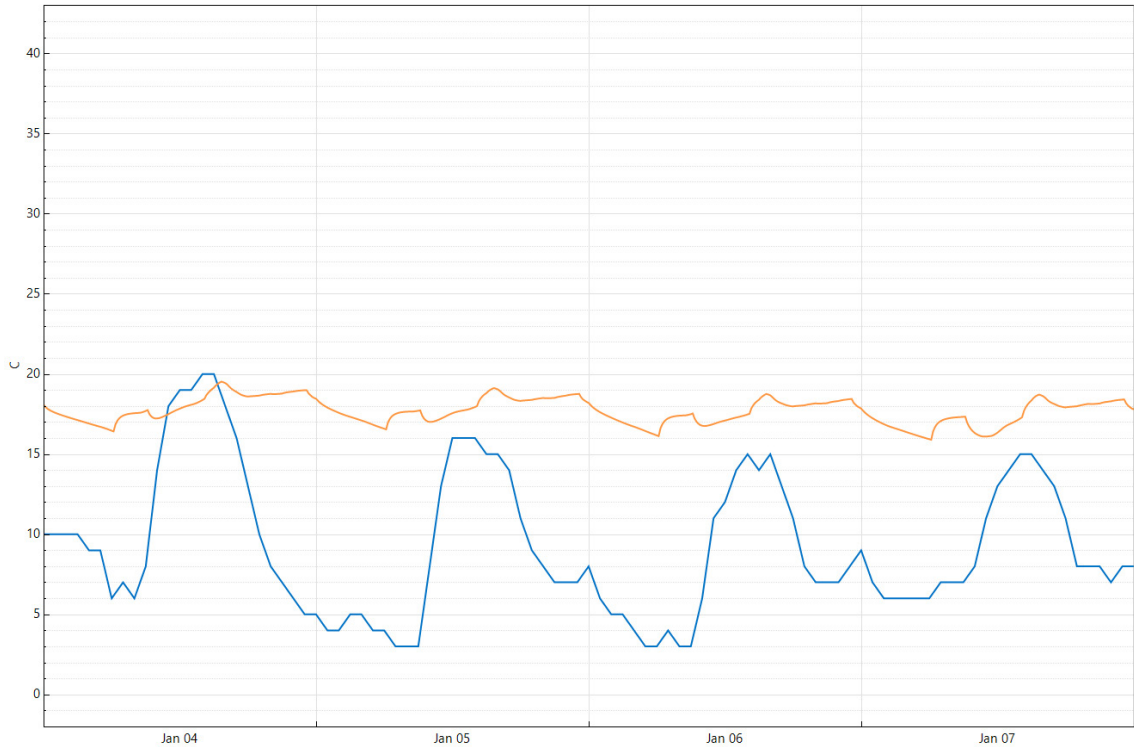


Figura 7.20. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

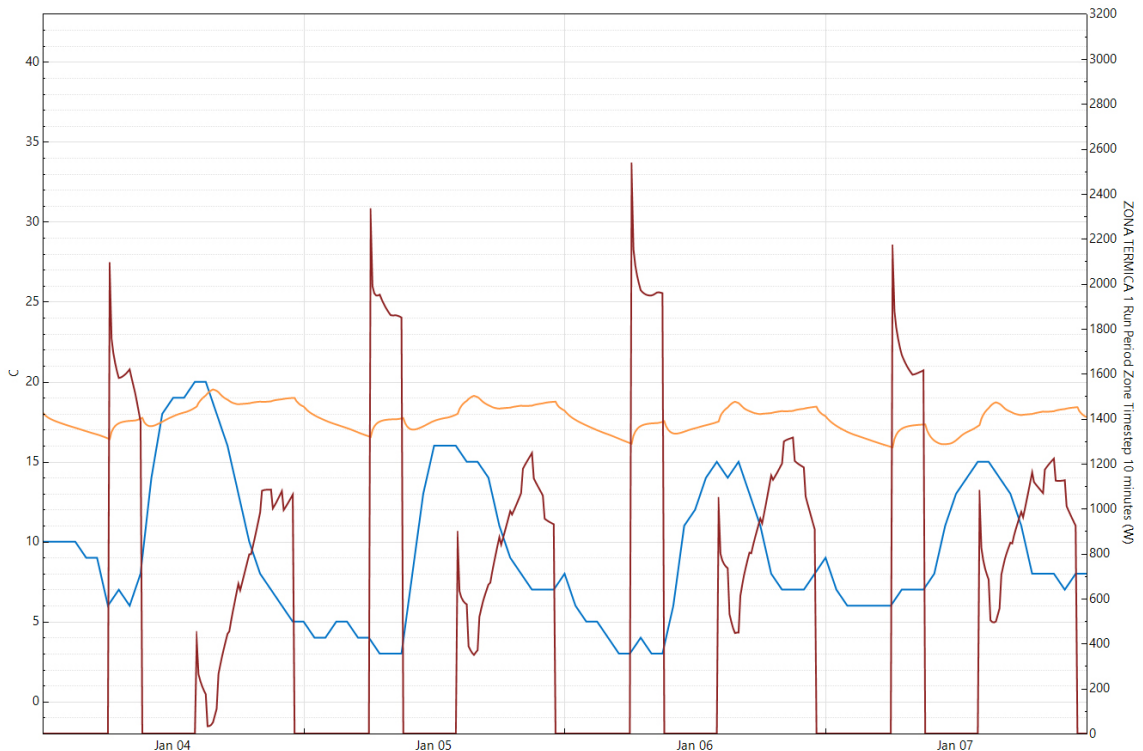


Figura 7.21. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero. Consumo energético del sistema de calefacción (W) en rojo.

En cambio, en las temperaturas mínimas se detecta una mayor variación, en torno a 3,5 °C. Una posible explicación a este comportamiento es que la cubierta del modelo de referencia no dispone de material aislante, por lo que es más fácil que se produzcan flujos de calor negativos (es decir, del interior al exterior), perdiendo parte del calor generado en el interior de la vivienda, especialmente en momentos de menores temperaturas y escasa o nula radiación solar. Estos flujos de calor negativos pueden justificar que la superficie exterior de la cubierta de referencia se mantenga a mayor temperatura durante la noche y madrugada,



momento en el que se alcanzan las temperaturas mínimas superficiales. En ese momento el calor generado en el interior de la vivienda de referencia durante el día o la tarde se va disipando desde el interior hacia el exterior.

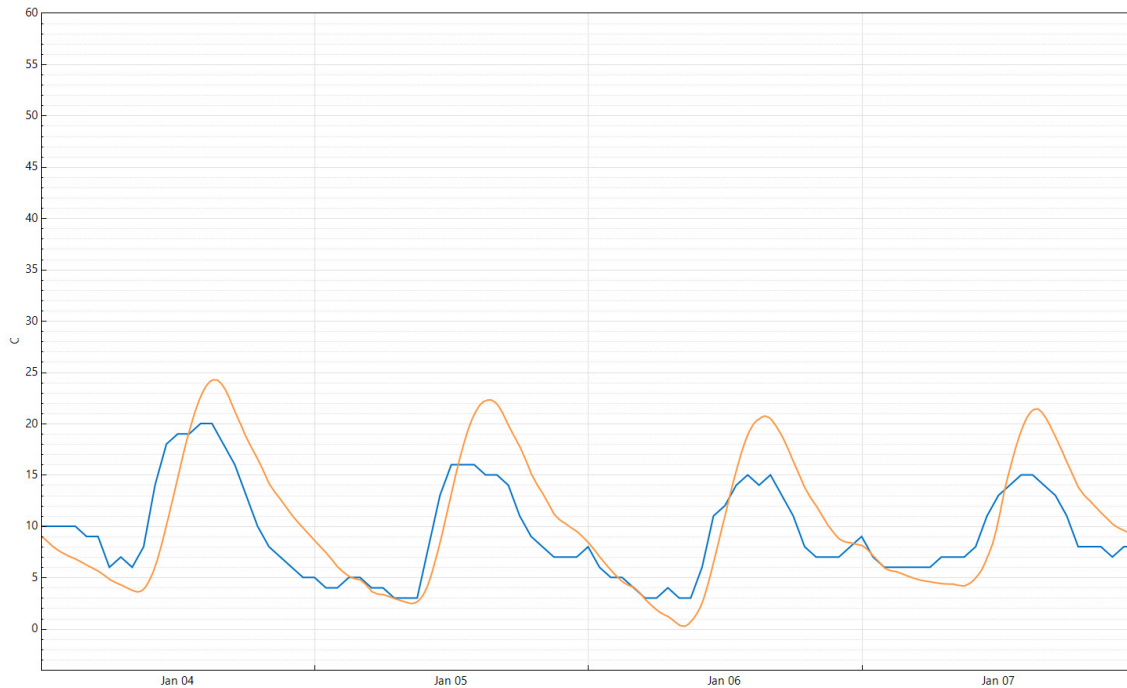


Figura 7.22. Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

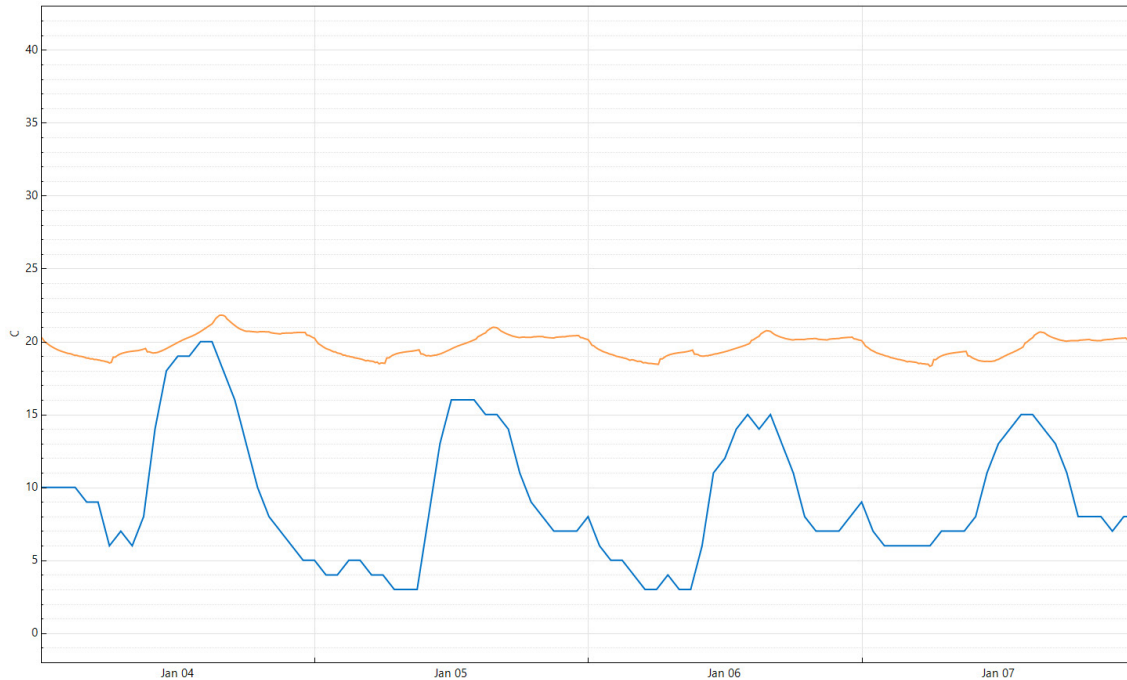


Figura 7.23. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

En relación con la temperatura superficial interior de la cubierta del modelo A (Figura 7.23), la máxima temperatura superficial interior (amarillo) alcanzada durante el periodo estudiado es de 21,8 °C y la mínima es de 18,3 °C, siendo la máxima variación térmica del periodo de 3,3 °C. La máxima temperatura se alcanza el día 4 a las 16:00 h, 2 horas después de alcanzar la máxima temperatura ambiente (azul) y 1 hora después de alcanzar la máxima temperatura en la superficie exterior de la cubierta. La explicación indicada previamente justifica las temperaturas superficiales interiores. El calor producido por el sistema de climatización se man-





tiene mejor en el interior, por eso las temperaturas superficiales son más cercanas al valor del termostato (21 °C), ya que la introducción de una capa de aislante y la mejora de la inercia del sistema constructivo limitan las pérdidas de calor desde el interior (problema principal en invierno). Las mayores variaciones térmicas exteriores justificadas en el párrafo anterior explican que la variación térmica interior sea levemente mayor que en el caso de la cubierta del modelo de referencia, aunque en este caso lo que más interesa es que la temperatura se mantenga cercana a la temperatura de consigna del sistema de calefacción o incluso la supere. Vemos en la figura 7.24 los periodos en los cuales el sistema de climatización está encendido y su consumo (rojo). El menor consumo se produce el día 4, en el cual las temperaturas superficiales exteriores e interiores son mayores que en los días sucesivos.

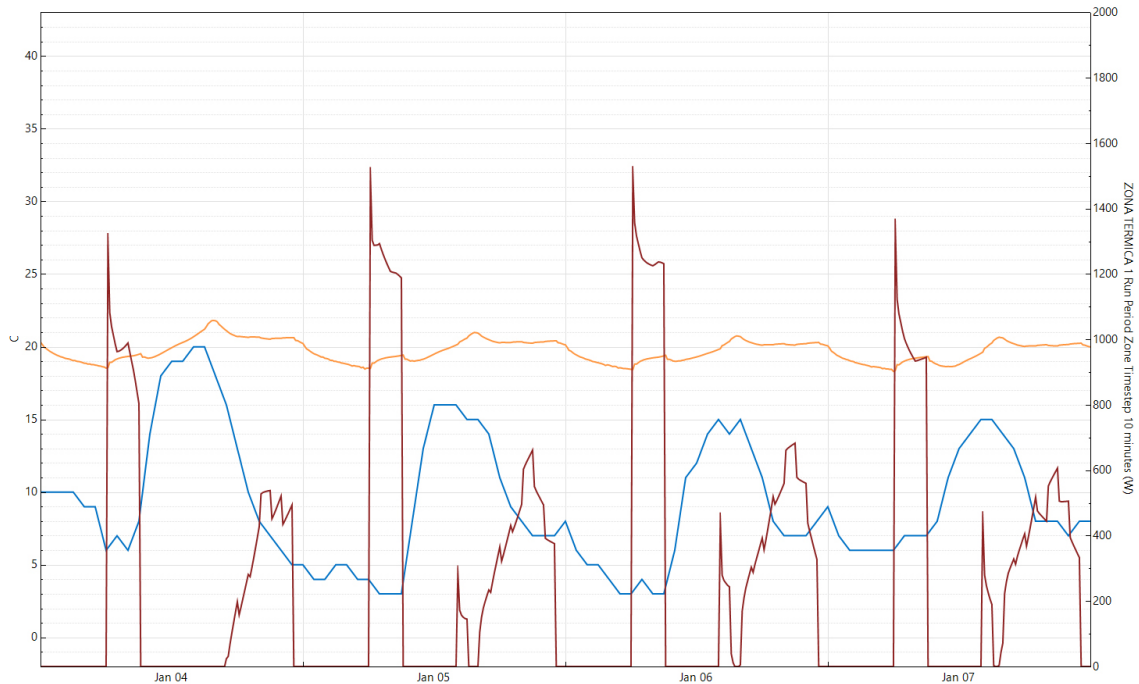


Figura 7.24. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero. Consumo energético del sistema de calefacción (W) en rojo.

Al estudiar la cubierta del modelo B (Figura 7.25) se aprecian las consecuencias de un LAI de 0,8, un albedo de 0,22 y una vegetación con escasa altura. Esto explica que las temperaturas superficiales exteriores tanto de la capa de vegetación (rojo) como de la capa de sustrato (amarillo) sean mayores que las obtenidas hasta el momento. Especialmente, se observa que a pesar de que en valores máximos la temperatura de la vegetación sea superior a la del sustrato, la diferencia entre las máximas de estas dos capas se va acortando con el paso de los días. La temperatura máxima superficial para el periodo estudiado en el exterior del sustrato es de 26 °C, el día 4 a las 14:30 h, media hora después de la máxima temperatura ambiente (azul) y de la máxima temperatura superficial exterior de la vegetación (27,6 °C). Este día se produce la máxima diferencia entre temperaturas máximas de sustrato y vegetación: 1,6 °C. Esta diferencia de menos de 2 °C se debe especialmente al bajo LAI (sombra poco densa).

Los datos tomados el día frío característico por las sondas del modelo B también mostraban unas temperaturas superficiales sobre el sustrato (sonda B4) elevadas, concluyendo que la escasez hídrica había producido una mortalidad y limitación de crecimiento de la vegetación, disminuyendo su poder de cobertura y justificando una mayor exposición del sustrato frente a la radiación solar. Por lo tanto, la limitación del crecimiento de la vegetación y su cobertura, la sombra poco densa y el albedo menor que la capa de gravas del modelo A producen máximas 1,7 °C por encima de los valores de temperatura máxima superficial exterior de los modelos de referencia y del modelo A.

Estas características, pero, también producen temperaturas mínimas más elevadas en el caso del sustrato. En este periodo, la mínima temperatura es de 3,6 °C y se alcanza el día 6, estando 3,3 °C por encima de la mínima temperatura de la cubierta del modelo A. Respecto a la vegetación, su mayor exposición produce temperaturas mínimas menores que las del sustrato y muy similares a las temperaturas ambientales.

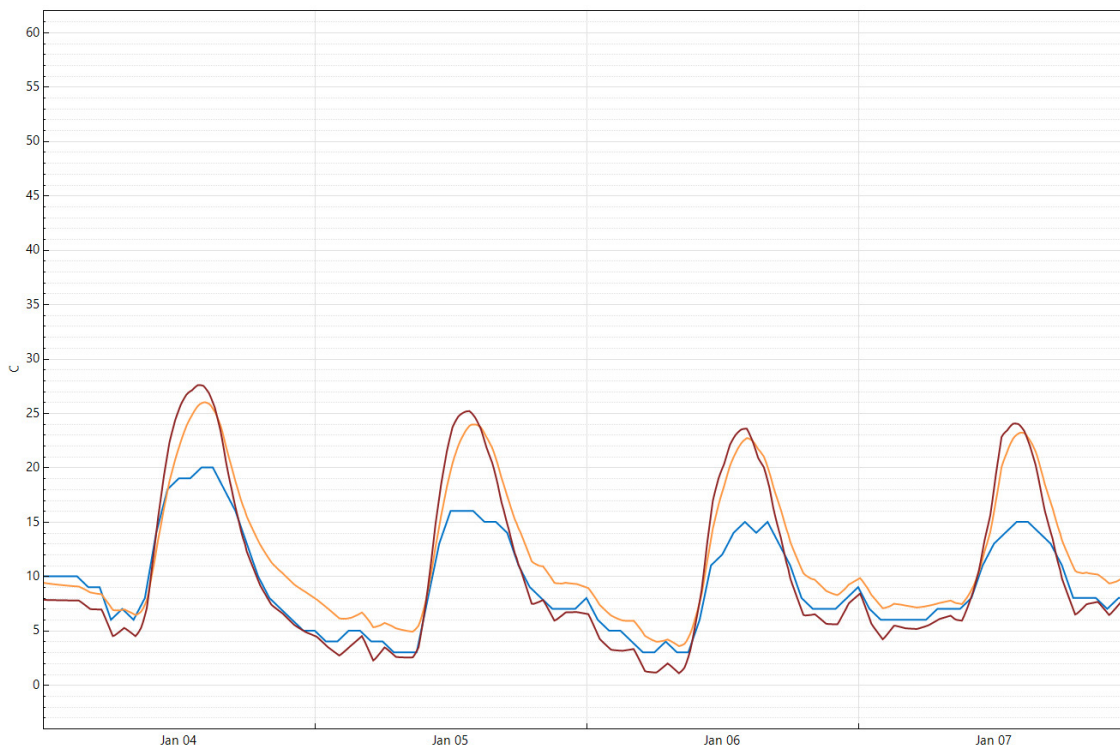


Figura 7.25. Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

En esta época, a pesar de las menores temperaturas y radiación solar, la escasez de precipitaciones produce valores mínimos de evapotranspiración (Figura 7.26). Las pérdidas por evapotranspiración, tanto del sustrato (verde claro) como de la vegetación (verde oscuro) son muy similares. Los valores máximos de este periodo se obtienen el día 4, siendo de  $-12,4 \text{ W/m}^2$  para el sustrato y  $-18,9 \text{ W/m}^2$  para la vegetación, mientras que en días sucesivos las máximas no superan los  $-10 \text{ W/m}^2$  y  $-14,5 \text{ W/m}^2$  en el sustrato y la capa de vegetación, respectivamente. De acuerdo con las precipitaciones producidas durante 2021 (véase tabla II.1), el día 1 de enero se produjeron 1,4 mm de precipitaciones. El día 4 de enero ya se sitúa 3 días después del último evento lluvioso y, tal como se observó en el apartado 6.6.2.3, tras el primer día posterior a las precipitaciones la humedad en la superficie del sustrato y la evaporación producida en él disminuyen considerablemente, produciéndose en los 4-5 días sucesivos una disminución de la evaporación y de la humedad disponible en el sustrato hasta alcanzar valores mínimos (entorno al 5 % de humedad disponible en el sustrato). Esto explica que el día 4 ya se vean valores de evapotranspiración en sustrato y vegetación muy bajos.

Los días 7, 8 y 9 se producen 5,9, 12,3 y 2,6 mm de precipitaciones en cada uno de ellos, respectivamente. Si se amplía el periodo estudiado (del día 4 de enero al 19 de enero), se puede comprobar como el día posterior a las lluvias, día 10, coincidiendo con la mayor temperatura ambiente del periodo, se producen las máximas pérdidas de calor por evapotranspiración en la capa de sustrato y vegetación (figura 7.27). El día 9, gracias a la humedad acumulada en el sustrato durante los días de lluvias (especialmente el día 8) ya se observan mayores pérdidas de calor por evapotranspiración.

Tras el primer día después del periodo de lluvias se produce la principal caída en las pérdidas por evaporación del sustrato, pasando de pérdidas de  $-489,9 \text{ W/m}^2$  el día 10 de enero a  $-202 \text{ W/m}^2$  el día 11, tal como se extraía de los datos tomados por las sondas de las maquetas (véase apartado 6.6.2.3). La bajada del día 11 al 12 es evidente, pero menos pronunciada, con una diferencia entre las pérdidas por evaporación del sustrato máximas de  $-168,5 \text{ W/m}^2$ . Al tercer y cuarto día posterior a las precipitaciones ya se estabilizan las pérdidas de calor por evapotranspiración en la capa de sustrato y vegetación, aunque continúan un lento descenso hasta alcanzar valores similares a los de los días 5, 6 y 7, previos a las lluvias.

Estas mayores pérdidas de calor por evapotranspiración en las capas de sustrato y vegetación también producen mayores diferencias entre las temperaturas máximas de las capas de sustrato (amarillo) y ve-



getación (rojo), debido a la disipación de calor, especialmente en la capa de sustrato, más expuesta a la radiación solar y de color más oscuro (figura 7.28). Esto explica, de igual forma, que la diferencia entre las temperaturas máximas de estas dos capas fuera mayor el día 4 (más próximo al último evento lluvioso) que en los días 5, 6 o 7.

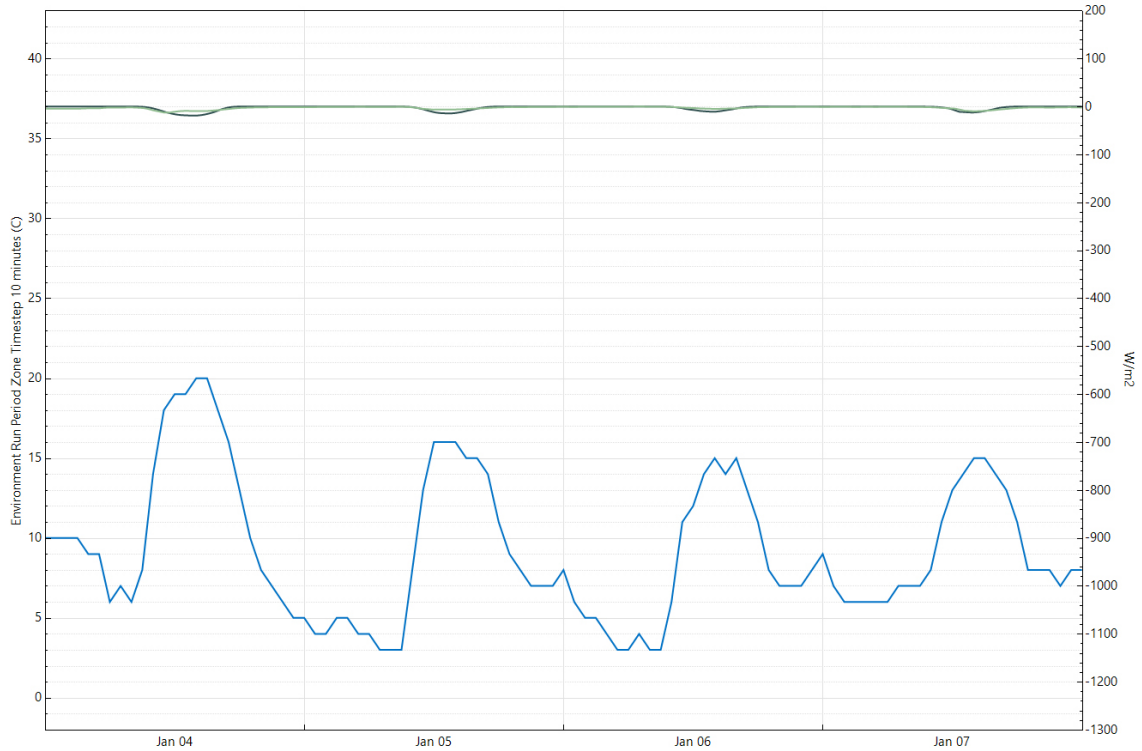


Figura 7.26. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

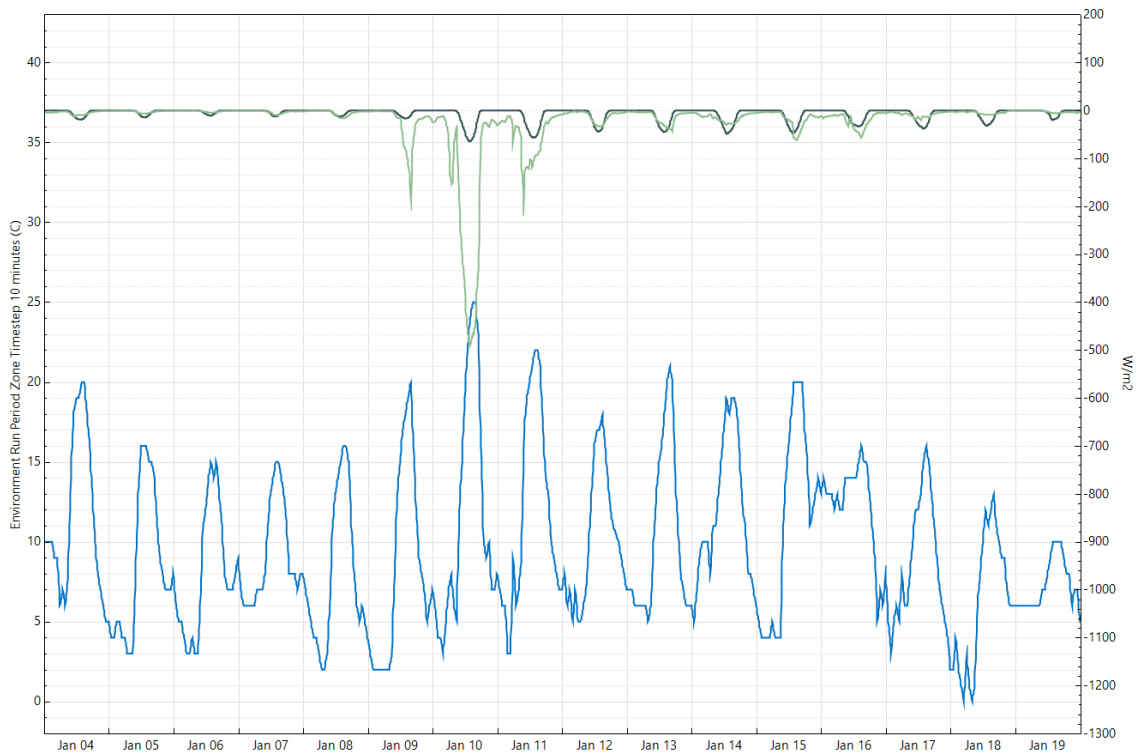


Figura 7.27. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 4 a 19 de enero.

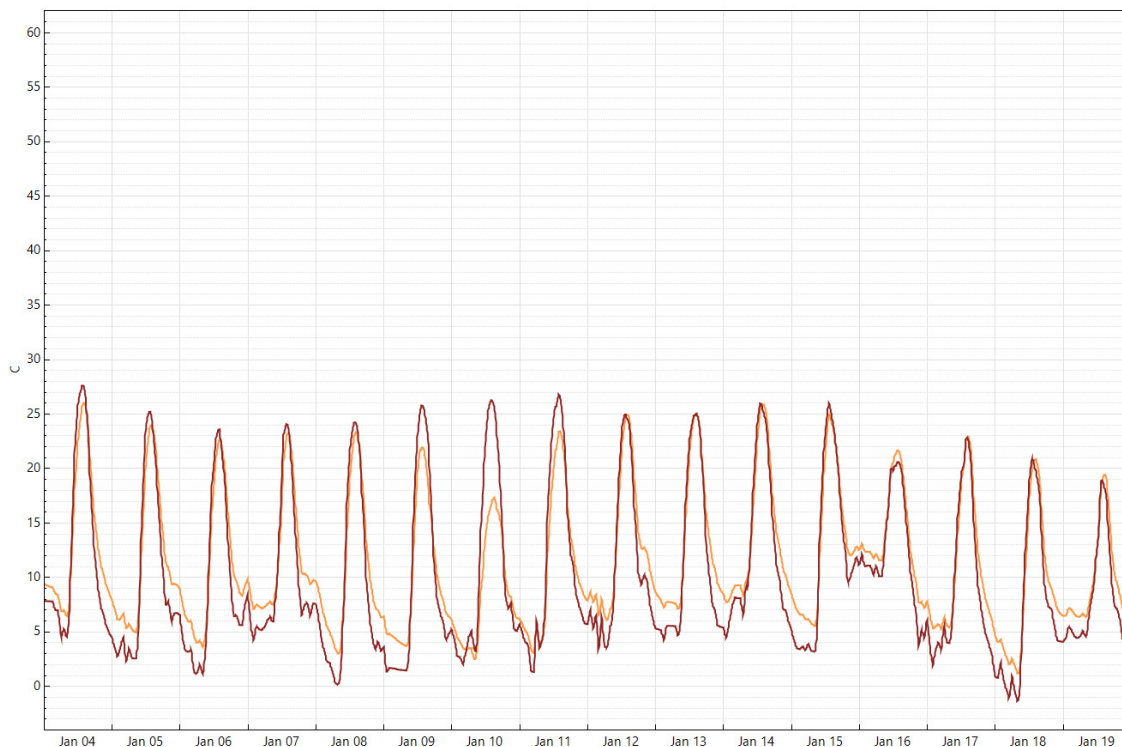


Figura 7.28. Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B durante los días 4 a 19 de enero.

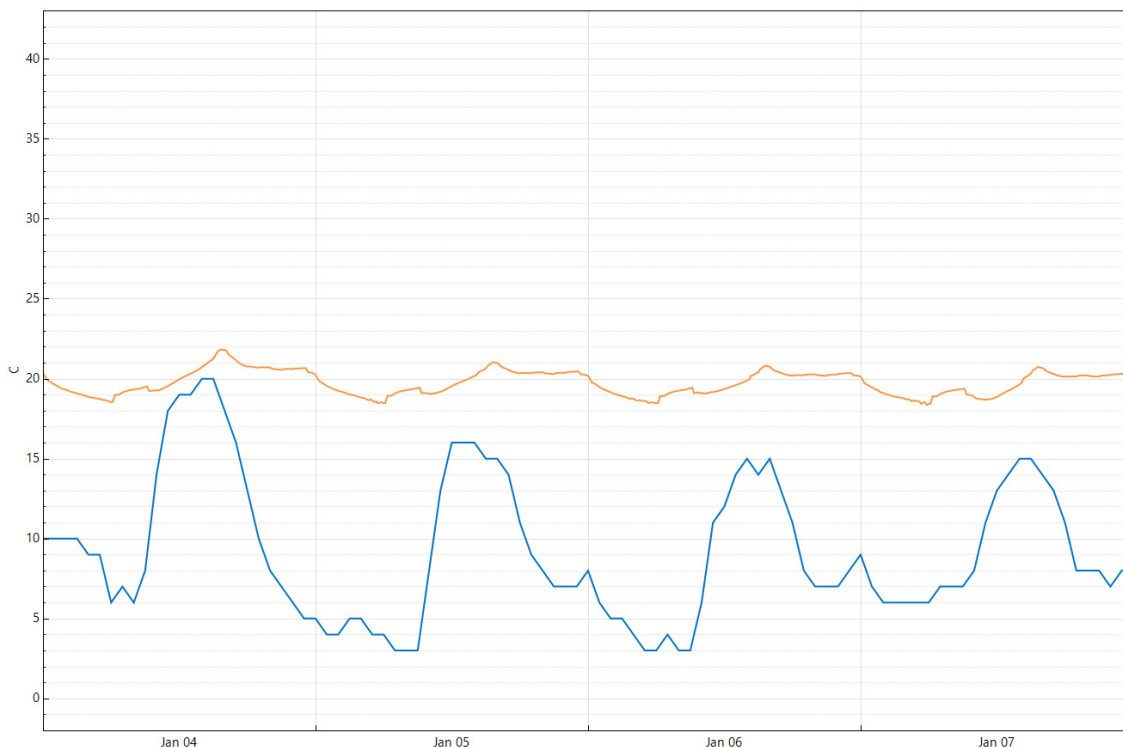


Figura 7.29. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo B en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

En la figura 7.27, la vegetación, durante las horas nocturnas sin radiación solar, presenta unas pérdidas por evapotranspiración nulas (verde oscuro), mientras que el sustrato sigue teniendo pérdidas durante la noche (verde claro). De hecho, las pérdidas por evapotranspiración del sustrato presentan un perfil simétrico y similar a la temperatura ambiente (azul) y la temperatura superficial del propio sustrato. Es decir, a mayor temperatura (haya o no radiación solar) mayores serán las pérdidas de calor. Estas mismas conclusiones se pueden extraer del apartado 6.6, al estudiar la humedad relativa detectada por las sondas B4 y C5,



tanto en el día frío característico como, especialmente, en el día cálido, en el cual las elevadas temperaturas nocturnas producían pérdidas de calor por evaporación en el sustrato a pesar de la nula radiación solar. Por lo tanto, las pérdidas por evapotranspiración de ambas capas, sustrato y vegetación, son mayores a mayores temperaturas ambientales, siendo el día de máximas pérdidas en este periodo el día 10, coincidiendo el mayor contenido de agua disponible y las mayores temperaturas ambientales.

Respecto a las temperaturas superficiales interiores de la cubierta del modelo B (Figura 7.29), las mayores temperaturas superficiales exteriores (tanto máximas como mínimas) no se traducen en valores más elevados en la superficie interior. La máxima temperatura superficial interior (amarillo) es de 21,8 °C y la mínima de 18,4 °C, valores iguales a los del modelo A. En este caso, la inercia térmica aportada por el sustrato minimiza la entrada de calor al interior de la cubierta. Además, como ya ocurría en el modelo A, el introducir una capa de material aislante, se limitan los flujos de calor negativos, manteniendo el calor en el interior con mayor facilidad. Estas temperaturas superficiales interiores de los modelos A y B explican que el consumo energético de calefacción de ambos modelos sea muy similar.

Por último, el comportamiento de la cubierta del modelo C se asemeja más al esperado de una cubierta ajardinada. La espesa capa de vegetación (LAI=5), el valor de albedo ligeramente elevado (0,3), la altura de la vegetación que facilita la existencia de una capa de aire entre la vegetación y el sustrato, y las mayores pérdidas de calor por evapotranspiración, favorecen que a pesar de la elevada radiación solar, la temperatura superficial exterior del sustrato (gracias al LAI y la altura) y de la vegetación (gracias al albedo y la evapotranspiración) sean las más bajas de los modelos estudiados. Llegan incluso a ser menores que la temperatura ambiente el día 4 (Figura 7.30).

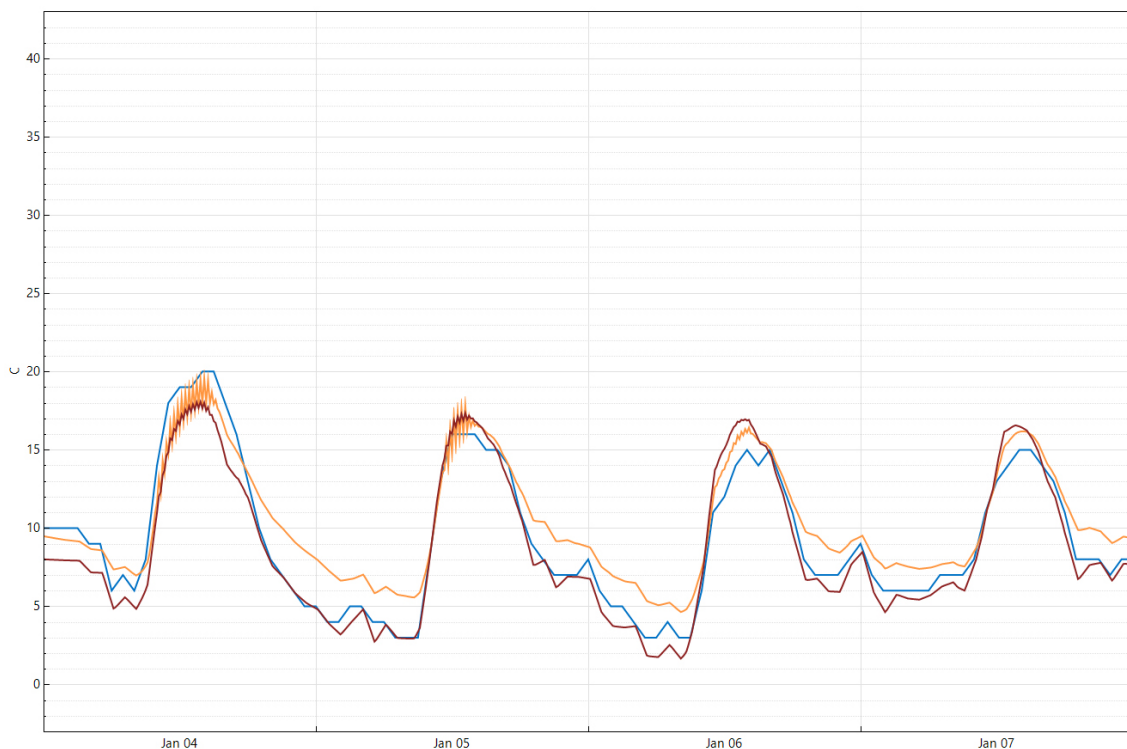


Figura 7.30. Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

Cabe mencionar que, en algunos días de la simulación, como se aprecia en los días 4, 5 y 6 de enero, se han producido distorsiones en las gráficas de temperatura y pérdidas de calor por evapotranspiración de sustrato y vegetación. Estas distorsiones visuales no afectan a los datos de temperatura superficial obtenidos. La temperatura máxima superficial exterior del sustrato (amarillo) es de 19,6 °C, el día 4 a las 14:00 h, coincidiendo con la máxima temperatura ambiente (azul) y la máxima temperatura superficial exterior de la vegetación (rojo) (18 °C). Respecto a las temperaturas mínimas, el sustrato presenta una temperatura mínima por encima de la vegetación y la ambiental, alcanzando los valores más altos de los modelos estudiados. La temperatura mínima del sustrato se alcanza el día 6 y es de 4,7 °C, 1,7 °C por encima de la temperatura



ambiente,  $4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  del modelo A y  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  del modelo B. Esto se puede deber a que la capa de vegetación que lo ha protegido de la incidencia directa del sol durante el día (gracias al elevado LAI) también lo protege durante las horas nocturnas de la baja temperatura ambiente, a pesar de que la altura de la vegetación pueda favorecer una ligera entrada de aire frío en esta capa.

Al igual que al hablar del modelo B, el día 4 de enero se sitúa tres días después del último día con precipitaciones. En el caso del modelo C, la vegetación no es capaz de regular la apertura de sus estomas, por lo que si dispone de agua (tras las lluvias producidas el 1 de enero), aumentará sus pérdidas de calor por evapotranspiración, disminuyendo su temperatura y quedando las máximas por debajo de la temperatura superficial del sustrato. En días sucesivos, en los que se va agotando el agua disponible, las temperaturas máximas de vegetación y sustrato son más similares.

De acuerdo con estas consideraciones, en la figura 7.31 se aprecia como los valores de evapotranspiración de la vegetación (verde oscuro) son muy superiores a los del modelo B, situándose las máximas pérdidas diarias en  $-246,5\text{ W/m}^2$  el día 4 para el modelo C, y en  $-18,9\text{ W/m}^2$  para el modelo B. En el caso del sustrato (verde claro) las pérdidas de calor por evaporación son ligeramente superiores a las del modelo B, situándose el valor máximo del modelo C el día 4 en  $-15,7\text{ W/m}^2$ , siendo de  $-12,4\text{ W/m}^2$  en el modelo B. Como se ha comentado previamente las pérdidas por evaporación en el sustrato dependen de la temperatura ambiente y superficial del sustrato, siendo esta última menor que en el modelo B debido a la vegetación con elevado LAI, albedo y la capa de aire entre vegetación y sustrato. Además, se debe recordar que las especies vegetales instaladas en el modelo C consumen mayor cantidad de agua que la vegetación tipo *sedum* del modelo B, por lo que un mayor almacenamiento de agua en el modelo ajardinado intensivo (C) implica también un mayor consumo de esta agua en la supervivencia de la vegetación.

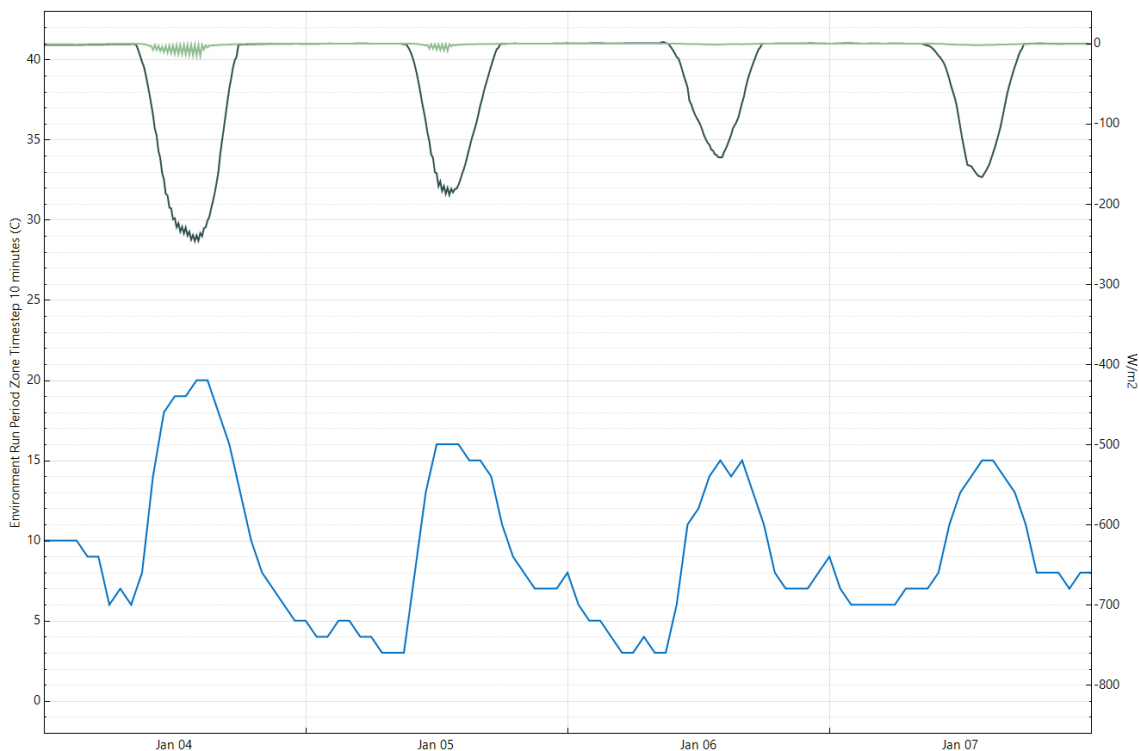


Figura 7.31. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $\text{W/m}^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

En la figura 7.32 se analiza el periodo del día 4 de enero al 19, analizando el comportamiento del modelo C en el periodo de lluvias del 7 al 9 de enero y en los días posteriores. En concordancia con la mayor disponibilidad de agua tras las lluvias y con el comportamiento del modelo B, el día 10 se producen las mayores pérdidas por evapotranspiración en la capa de vegetación, produciéndose un descenso en los días posteriores. El cuarto día posterior a las lluvias, el 13 de enero, se produce un ligero ascenso en las pérdidas por evapotranspiración en vegetación y sustrato, que empezaran a decaer de nuevo a partir del día 15. Esta oscilación, que también se observó en el análisis de la humedad y temperatura de las sondas de las maquetas



tras un periodo de lluvias (véase apartado 6.6.2.3), con un aumento de la humedad de la sonda superficial, C5, al cuarto días posterior a las lluvias, se puede justificar tal y como se indicó en este apartado. La mayor profundidad de sustrato, así como la disponibilidad de agua en capas más interiores y menos accesibles para las raíces de la vegetación genera que, cuando se produce una desecación de las capas más exteriores, el agua almacenada en capas interiores se evapora y se emplea para aumentar las pérdidas de calor por evapotranspiración, especialmente del sustrato. En la figura 7.32 se puede observar que el mayor repunte en las pérdidas de calor entre los días 13 y 15 se produce en las pérdidas por evaporación del sustrato (verde claro).

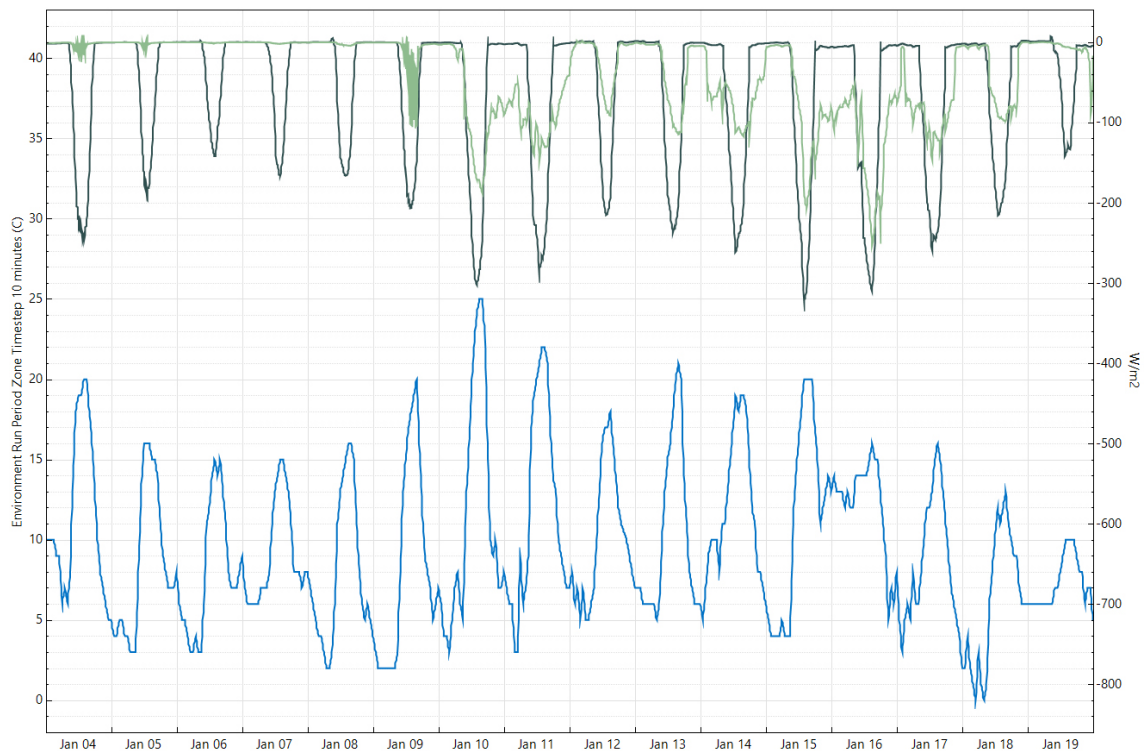


Figura 7.32. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 4 a 19 de enero.

Las temperaturas superficiales exteriores más bajas de entre los modelos estudiados, así como las temperaturas mínimas más altas, reducen la variación térmica diaria. Esto, sumado a la mayor inercia térmica del sustrato de 60 cm de espesor, minimizan los flujos de calor a través de la cubierta.

En el caso de la temperatura interior de la cubierta del modelo C (Figura 3.33), esta menor variación térmica diaria en la superficie exterior de la cubierta se traduce en una menor variación térmica diaria en la superficie interior (comportamiento similar al del modelo B). En el periodo estudiado, la máxima temperatura superficial interior (amarillo) es de  $21,7^{\circ}C$  y la mínima de  $18,2^{\circ}C$ , con una variación térmica el día 4 de  $3,4^{\circ}C$ , al igual que en el modelo B y A. Además, al igual que ocurría en estos dos modelos, la introducción de una capa de aislamiento térmico y el aumento de la inercia del sistema de la cubierta limita los flujos de calor negativos, manteniendo el calor producido por el sistema de climatización en el interior con mayor facilidad. En días más fríos o durante la noche, el sustrato del modelo C presenta una menor temperatura superficial exterior que en el caso del modelo B, hecho que justifica unas menores temperaturas superficiales interiores (la mínima temperatura superficial interior del modelo B es  $0,2^{\circ}C$  mayor que el modelo C) y, por lo tanto, un consumo energético de calefacción ligeramente superior (en un 5,98 %).

Por lo tanto, el modelo C presenta una distribución de temperaturas superficiales del sustrato más similares a la temperatura ambiente, seguido por el modelo A (cuya máxima se encuentra  $4,7^{\circ}C$  por encima del modelo C) y el modelo B. Los datos obtenidos por las sondas superficiales de las tres maquetas en el día representativo frío aportan datos muy similares a los obtenidos en esta simulación (véase apartado 6.6.2.2). En el caso del modelo C, la sonda C5 alcanzó la menor temperatura máxima diaria, asemejándose a la temperatura ambiente del aire, mientras que la sonda A4 registraba una temperatura máxima  $2,8^{\circ}C$  por encima



del modelo C. La sonda B4 registró, al igual que en la simulación energética, la mayor de las temperaturas superficiales máximas. En la simulación energética la diferencia entre las temperaturas superficiales máximas del modelo B y C ha sido de 6,4 °C y en los datos obtenidos de las sondas ha sido de 7,35 °C.

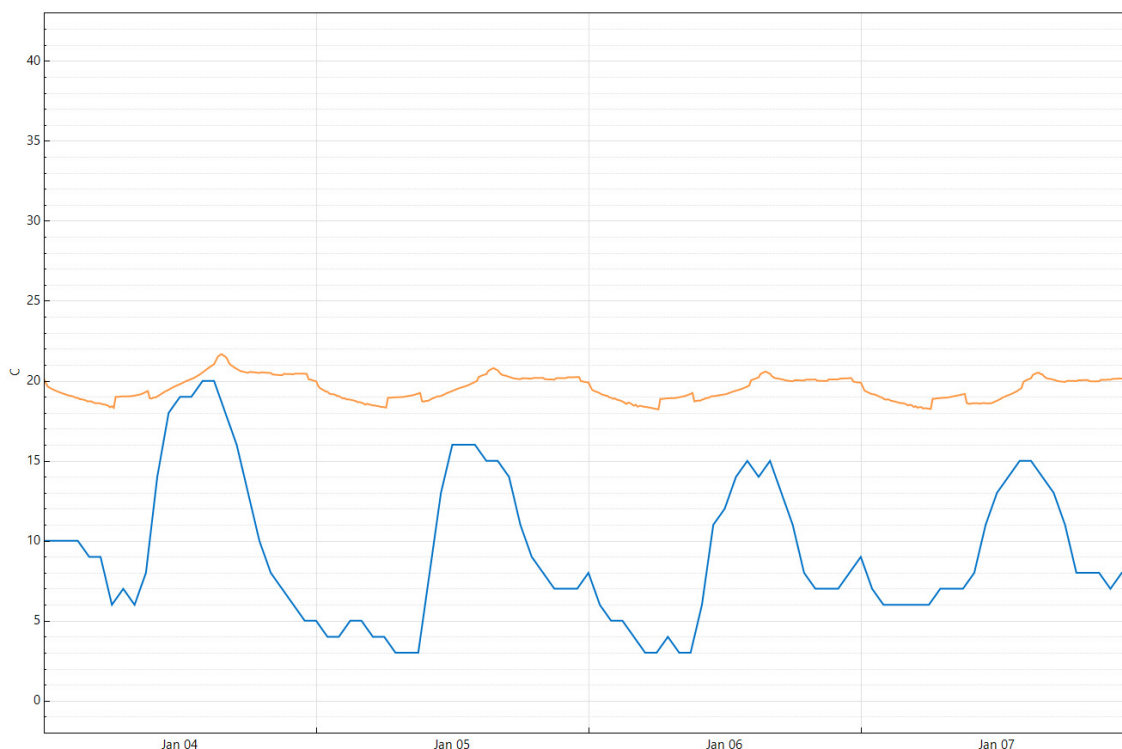


Figura 7.33. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo C en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.

Para estudiar la **época de refrigeración**, vamos a tomar los datos referidos a los días del 20 al 23 de julio. Este es uno de los meses, junto a agosto, de mayor consumo energético de refrigeración para todos los modelos (el día cálido representativo tomado para estudiar los datos de las sondas ha sido en el mes de julio, día 12). Se puede observar en la figura 7.34 que la mayor variación diaria de la temperatura ambiente (azul) se produce el día 20, con una diferencia de 10 °C. En el periodo estudiado la máxima temperatura ambiente es de 31 °C, alcanzada por primera vez el día 20 de las 12:00 h a las 15:00 h, mientras que la mínima es de 21 °C, registrada por primera vez el mismo día 20 de 04:00 h a 06:00 h. De la gráfica se puede extraer que en los días 20, 22 y 23 se producen las mismas temperaturas máximas y mínimas, mientras que en el día 21 la variación térmica diaria es menor, ya que se alcanzan temperaturas máximas y mínimas menos extremas.

La radiación solar (amarillo) máxima alcanza un valor de 839 W/m<sup>2</sup> los días 20 y 21 de julio. El día 20 se alcanza este máximo a las 12:30 h, media hora después que el pico de temperatura máxima de ese mismo día. La radiación solar máxima más baja del periodo se produce el día 23, con un valor de 817 W/m<sup>2</sup>.

En este contexto la cubierta del modelo de referencia (Figura 7.35) alcanza una temperatura superficial exterior (amarillo) máxima el día 22 de 51,6 °C, 20,6 °C sobre la temperatura ambiente (azul). Este máximo se alcanzó entorno a las 14:00 h, 1 hora antes que la máxima temperatura ambiente. Esta temperatura tan elevada, el hecho de que se alcance antes que la temperatura ambiente máxima y la gran variación térmica diaria se explican, especialmente, por la elevada radiación solar propia del clima mediterráneo de València en verano. Ese día, la variación térmica de la superficie exterior de la cubierta fue de 28 °C (18 °C más que la variación de temperatura ambiente). La temperatura superficial mínima en este periodo se alcanzó los días 20, 22 y 23, con 21 °C. El día 22 se registró a las 6:00 h. La diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas del modelo de referencia y del aire se debe a la radiación solar: hay mayor diferencia entre las temperaturas máximas, mientras que la diferencia entre las temperaturas mínimas es menor y similar a la diferencia que se produce en enero (época de calefacción). Esto ejemplifica la elevada influencia de la radiación solar en este clima.



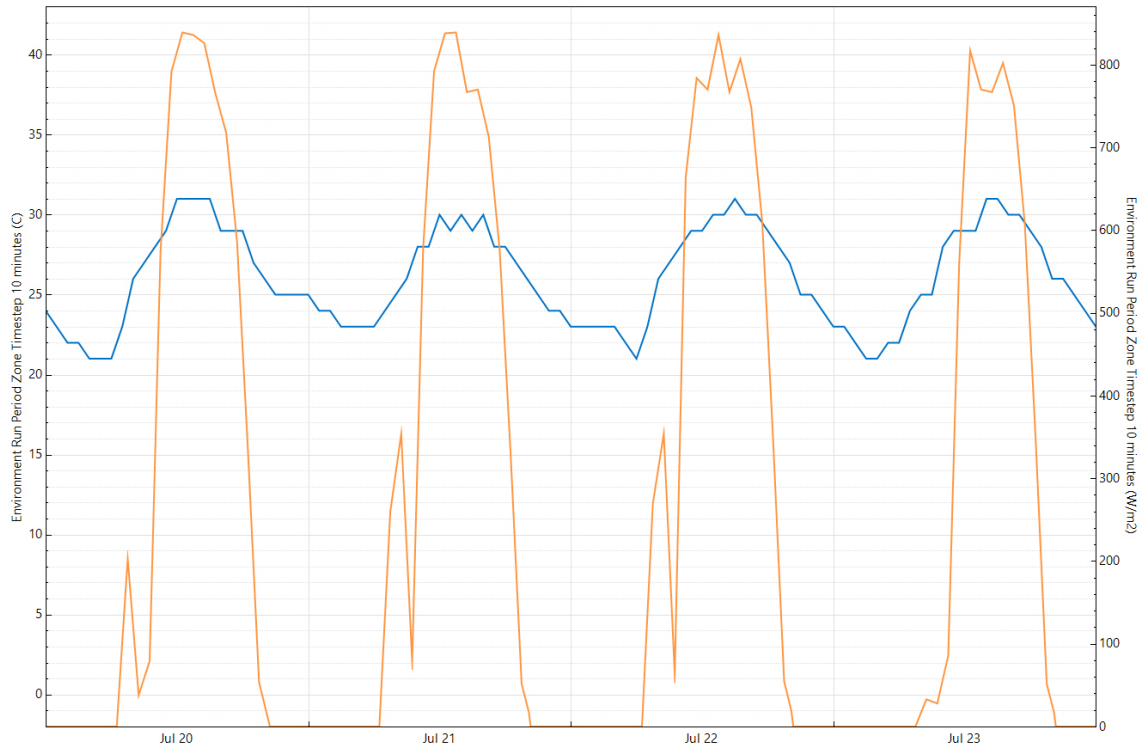


Figura 7.34. Condiciones ambientales durante los días 20 a 23 de julio: temperatura ambiente (°C) en azul y radiación solar (W/m<sup>2</sup>) en amarillo.

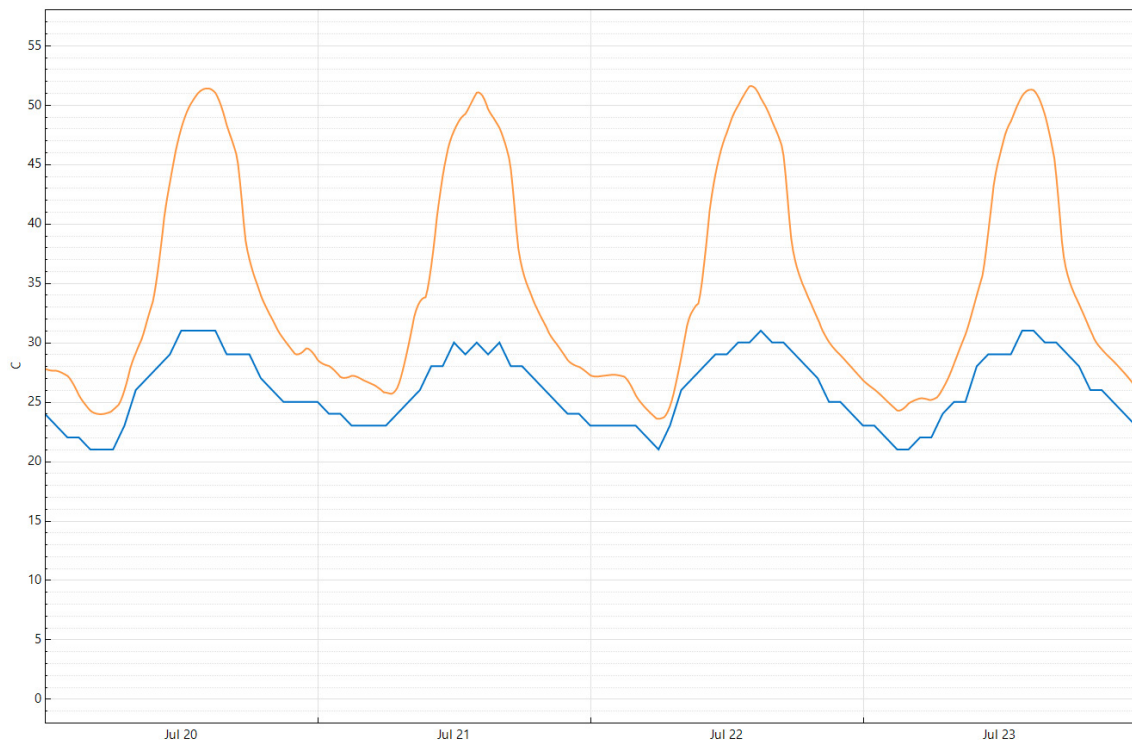


Figura 7.35. Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

La temperatura superficial interior (amarillo) de la cubierta del modelo de referencia varía, durante el periodo estudiado, entre los 28,7 °C y 26,8 °C, siendo la variación máxima del día 22 de 1,8 °C (Figura 7.36). Hay que considerar que el sistema de refrigeración está en funcionamiento para asegurar temperaturas cercanas a los 25 °C (temperatura de consigna del sistema de refrigeración) especialmente por las tardes, ya que estos cuatro días son entre semana. La temperatura máxima superficial en el interior se alcanza sobre las 16:30 h el día 22, una hora y media más tarde que la máxima temperatura ambiental y dos horas y media



después que la máxima temperatura superficial exterior de la cubierta de ese día. También se detecta un repunte de la temperatura superficial interior a las 00:00 h, aproximándose a la temperatura máxima diaria. Esto se debe a que se apaga el sistema de refrigeración a las 23:00 h (Figura 7.37) y el frío acumulado en el interior de la vivienda se transfiere al exterior (flujos de calor negativos) a través de la envolvente, con baja inercia y sin material aislante, equilibrándose con la temperatura ambiente (azul), que desciende al tratarse de horas nocturnas sin radiación solar.

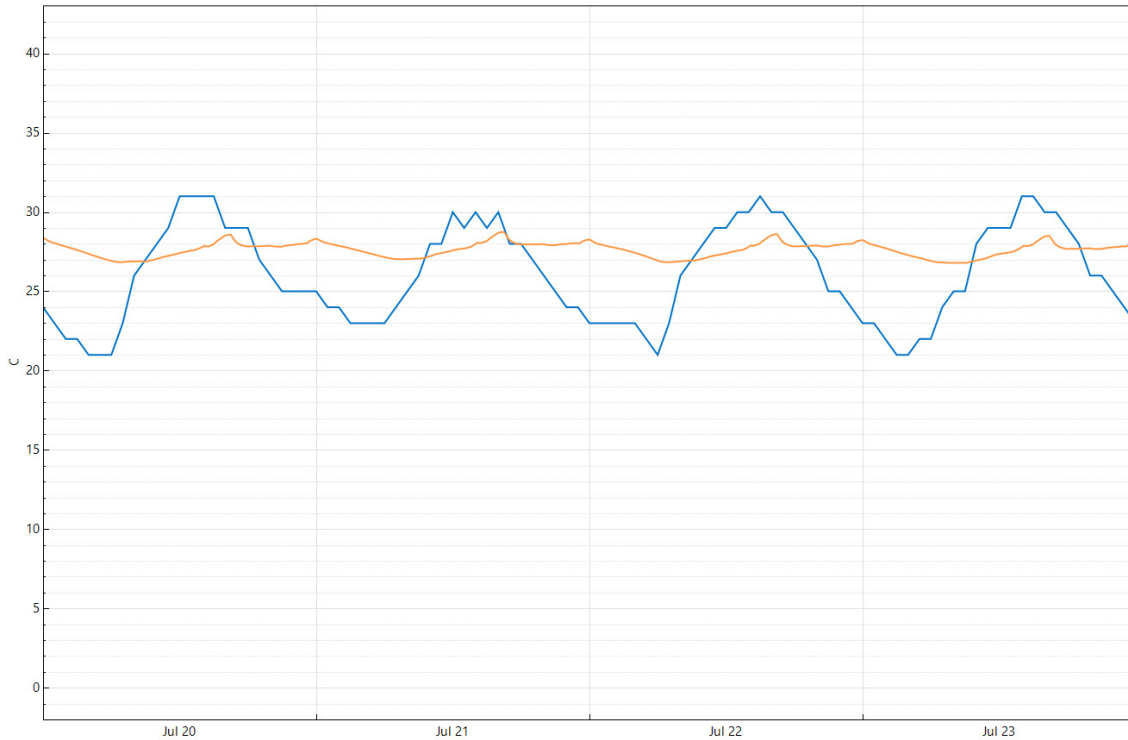


Figura 7.36. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

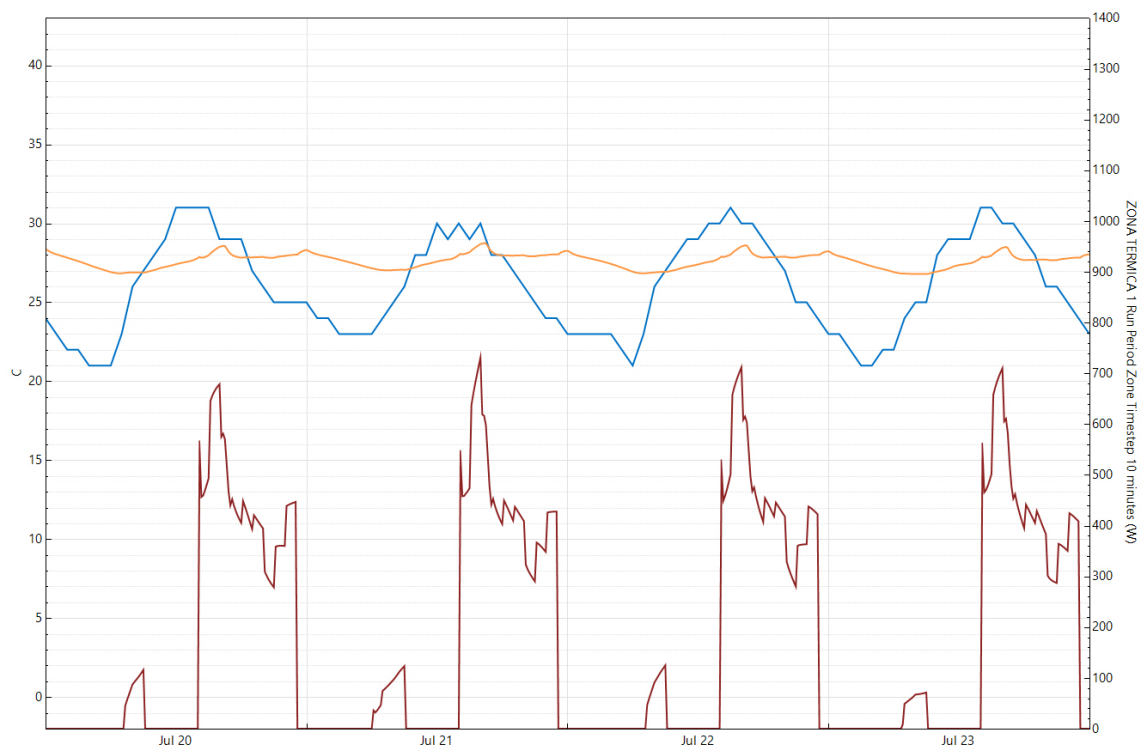


Figura 7.37. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio. Consumo energético del sistema de refrigeración (W) en rojo.



Para el caso de la cubierta del modelo A, en la figura 7.38, se observa que la máxima temperatura de la superficie exterior (amarillo) de la cubierta el día 22 es de 52,5 °C, alcanzada a las 14:30 h, media hora antes de la máxima temperatura ambiente (azul) y media hora después de la máxima temperatura superficial de la cubierta del modelo de referencia. El día 22 la variación térmica fue de 32,3 °C (22,3 °C más que la temperatura ambiente y 4,3 °C más que el modelo de referencia). Respecto a la mínima temperatura superficial exterior del día 22, se registran 20,2 °C a las 6:30 h de la mañana, 30 minutos después que la mínima temperatura ambiente.

Las temperaturas mínimas y máximas del modelo A son más extremas que en el modelo de referencia, hecho que se traduce en una variación térmica diaria mayor. La explicación se puede derivar de lo expuesto para el caso de calefacción: la cubierta de referencia no dispone de material aislante, por lo que se producen con mayor facilidad flujos de calor negativos (es decir, del interior al exterior), perdiendo parte del frío generado en el interior de la vivienda. Este efecto se produce especialmente en momentos de máxima radiación solar y mayor temperatura ambiente. Estos flujos de calor negativos pueden explicar que la superficie exterior de la cubierta del modelo de referencia se mantenga a menor temperatura durante el día, cuando se alcanzan las temperaturas máximas superficiales, existiendo una diferencia de 0,9 °C entre la temperatura máxima superficial del modelo de referencia y el modelo A. En el caso de las temperaturas mínimas superficiales la diferencia es de 3,4 °C.

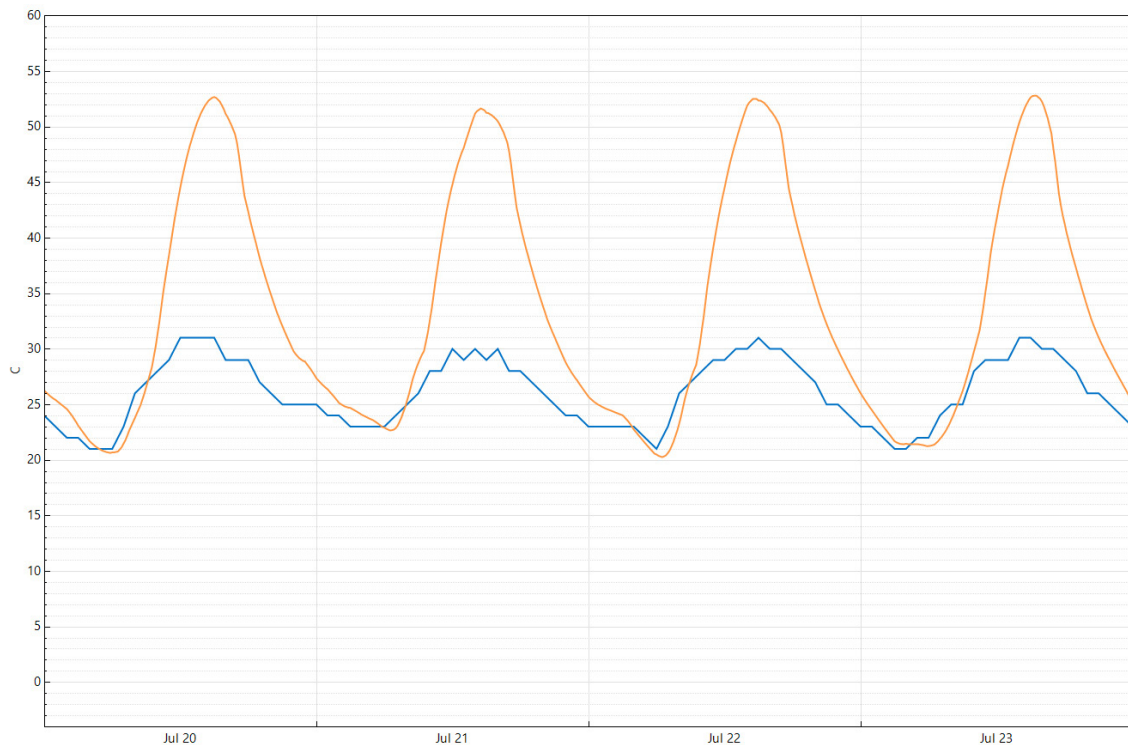


Figura 7.38. Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

Respecto a la temperatura superficial interior (amarillo) de la cubierta, la máxima temperatura alcanzada en el periodo estudiado es de 27,8 °C y la mínima es de 26,0 °C, con una variación térmica el día 22 de 1,7 °C (Figura 7.39). La máxima temperatura superficial en el interior el día 22 se alcanza a las 16:00 h, una hora después de alcanzar la máxima temperatura ambiente y una hora y media después de alcanzar la máxima temperatura superficial exterior de la cubierta. La explicación indicada previamente justifica las temperaturas superficiales interiores. El frío producido por el sistema de refrigeración se mantiene mejor en el interior, por eso las temperaturas superficiales son más cercanas al valor de consigna del sistema de refrigeración (25 °C), especialmente en las horas que este se encuentra encendido (Figura 7.40). Esto se produce gracias a que la capa aislante limita las ganancias de calor desde el exterior y las pérdidas de frío del interior (problema principal en verano). Las mayores variaciones térmicas exteriores del modelo A no afectan a la variación térmica interior, ya que esta es levemente menor en el modelo A que en el modelo de referencia (0,1 °C menos). Cabe destacar que, como en el modelo de referencia, se producen repuntes en la temperatura interior



especialmente cuando se apaga el sistema de climatización, pero menos pronunciados. Además, la inercia térmica de la envolvente no permite los flujos de calor negativos por la noche y el calor acumulado durante todo el día por la cubierta se transmite hacia el interior durante la noche (desfasado en el tiempo gracias al aumento de la inercia del sistema). Por lo tanto, a pesar de que la temperatura ambiente disminuya en las horas nocturnas, la temperatura interior se mantiene bastante estable sin disminuir. En este caso, una ventilación natural por la noche favorecería un enfriamiento del interior.

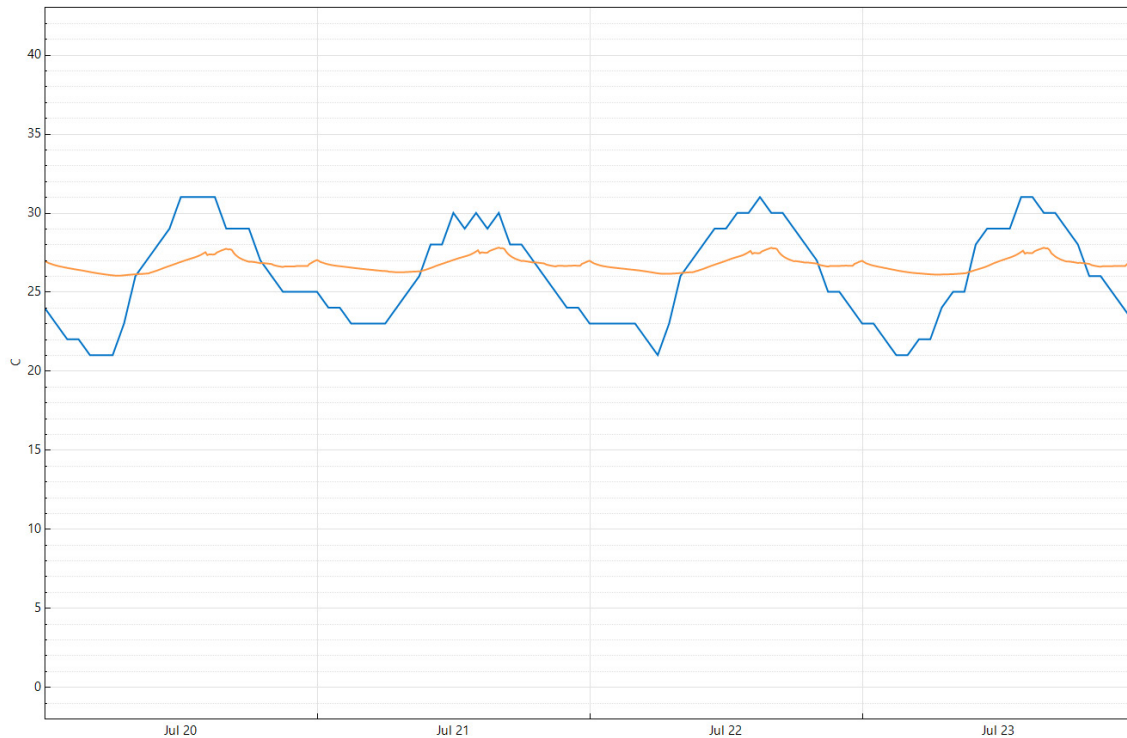


Figura 7.39. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

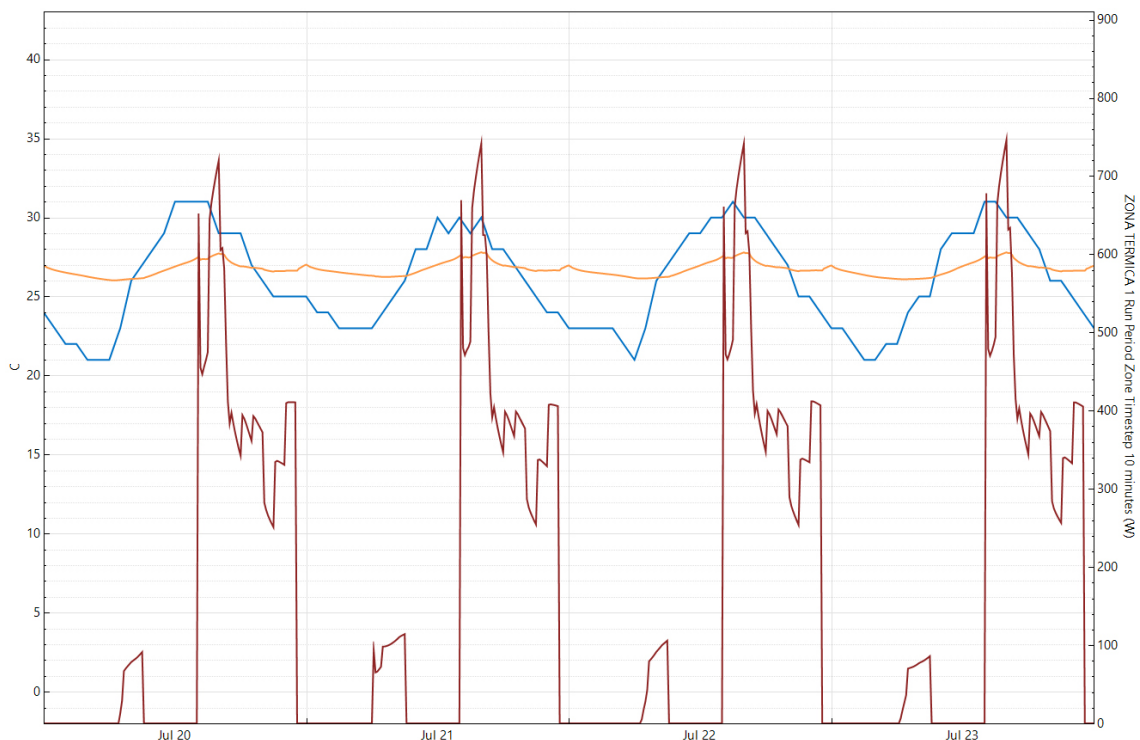


Figura 7.40. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio. Consumo energético del sistema de refrigeración (W) en rojo.



En la figura 7.41 se analiza el caso del modelo B, donde se perciben las consecuencias de un LAI de 0,8, albedo de 0,22, vegetación de poca altura y escasas precipitaciones. Esto explica que las temperaturas superficiales exteriores tanto de la capa de vegetación como de la capa de sustrato sean mayores que las obtenidas hasta el momento en los modelos de referencia y el modelo A. Concretamente, la temperatura exterior del sustrato (amarillo) es mayor que la de la vegetación (rojo), debido especialmente al bajo LAI (sombra poco densa) y la falta de precipitaciones, que producen un estancamiento del crecimiento de la vegetación, una mayor mortalidad y una menor cubrición del sustrato, el cual posee un albedo inferior al de la vegetación o la capa de gravas del modelo A. El día 22, la temperatura máxima superficial en el exterior del sustrato es de 56,3 °C, alcanzada a las 14:00 h, una hora antes que la máxima temperatura ambiente y coincidiendo con la máxima temperatura superficial exterior de la vegetación (54,2 °C). La variación térmica del sustrato ese mismo día es de 32,7 °C. Estas propiedades que producen máximas 4,7 °C y 3,8 °C por encima de los valores de los modelos de referencia y A, respectivamente, también producen temperaturas mínimas más elevadas. En este periodo, la mínima alcanzada el día 22 es de 23,6 °C, 3,4 °C por encima de la mínima de la cubierta del modelo A.

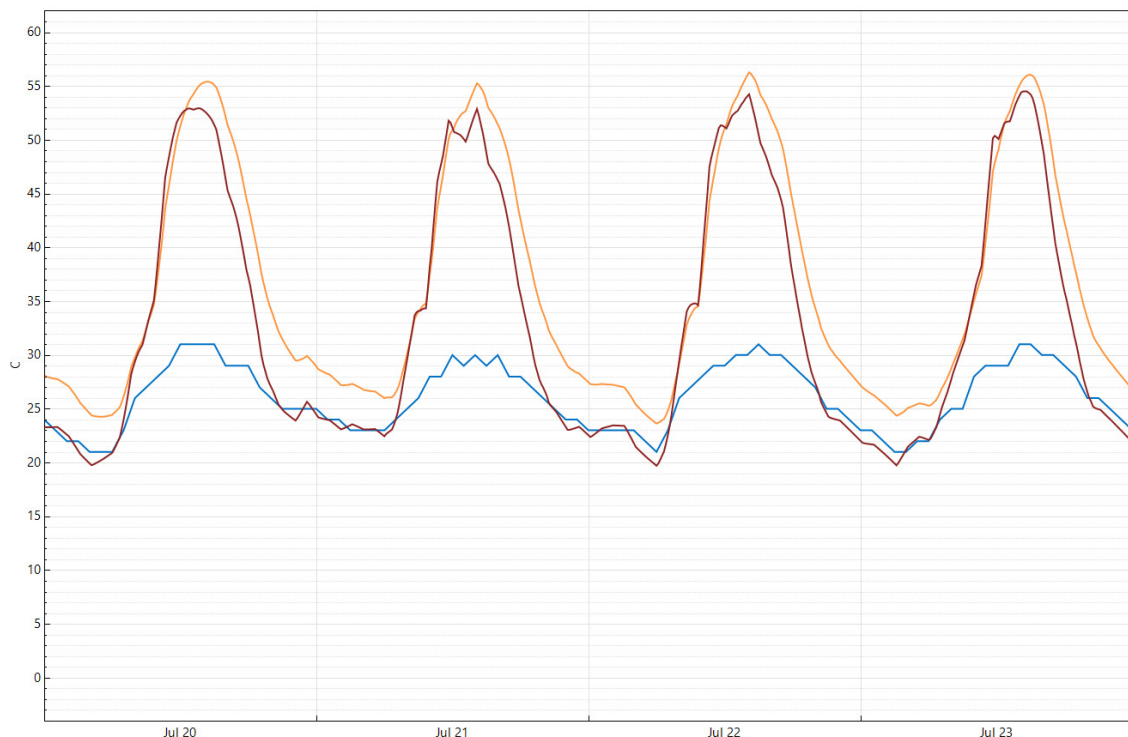


Figura 7.41. Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

En esta época, con predominio de temperaturas ambientales elevadas (azul) y escasas lluvias, se produce una escasez de humedad y agua disponible en el sustrato. Además, en este modelo la capacidad de almacenamiento de agua es limitado, debido al poco espesor de esta capa (10 cm). Las últimas precipitaciones se produjeron el día 7 de julio, con 1,8 mm, por lo que el día 20 de julio hace ya 13 días que no se registraron lluvias (véase tabla II.1). En este caso, la evapotranspiración, como mecanismo de disipación del calor, alcanza valores mínimos (Figura 7.42). Ningún valor máximo de pérdidas por evapotranspiración en el sustrato supera los  $-9 \text{ W/m}^2$ , ni los  $-2 \text{ W/m}^2$  en la vegetación. Las escasas lluvias previas justifican que las pérdidas de calor por evapotranspiración producidas estén muy por debajo de las registradas en el mes de enero (periodo frío), a pesar de la elevada radiación solar y temperaturas ambientales del mes de julio. De hecho, al contrario que en los datos del periodo frío, son mayores las pérdidas producidas en el sustrato (verde claro), ya que el tipo de vegetación instalada en el modelo B (*sedum*) tiene la capacidad de cerrar los estomas en épocas de estrés hídrico, por lo que mantiene el agua disponible para su supervivencia y reduce el mecanismo de evapotranspiración. Al tratarse de cubiertas ajardinadas sin riego (autosuficientes), dependen de las precipitaciones y el agua almacenada para la correcta disipación del calor por evapotranspiración, tal y como se ha estudiado en el apartado 6.6.2.3.



Esta escasa evapotranspiración, debido al estrés hídrico y la capacidad de regular la apertura de los estomas, explica las elevadas temperaturas que se consiguen en la superficie de la vegetación y el sustrato, ya que el principal sistema de disipación de calor en las cubiertas ajardinadas no está funcionando completamente. Además de encontrarse limitadas las pérdidas de calor por evapotranspiración, la mortalidad de la vegetación y la escasa cobertura debido a la escasez de agua y el bajo LAI implican una mayor incidencia directa de la radiación solar sobre la capa de sustrato. Esto sumando a su bajo albedo implica una mayor absorción de radiación por parte del sustrato, aumentando su temperatura y produciendo las mayores temperaturas superficiales exteriores entre los modelos estudiados.

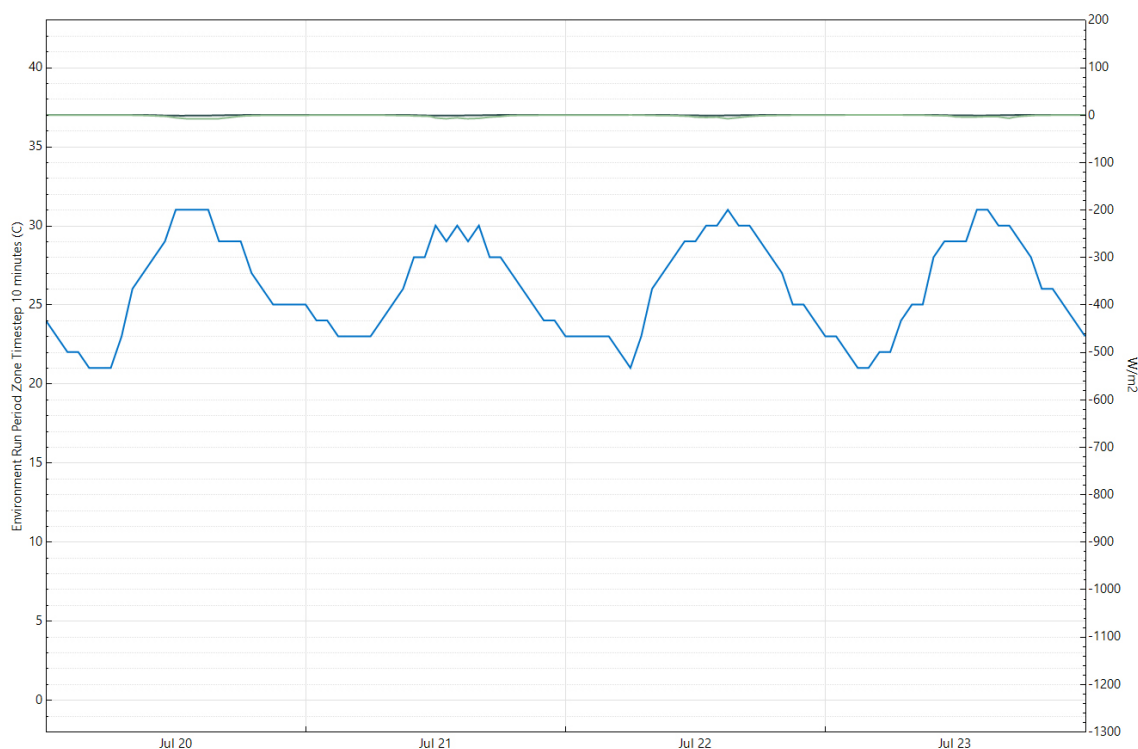


Figura 7.42. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

El día 26 de julio se produce un evento lluvioso destacable, descargando en 24 horas 17,7 mm. Tal y como se espera (véase apartado 6.6.2.3) el día siguiente, 27 de julio, se producen las mayores pérdidas de calor por evapotranspiración en las capas de vegetación y sustrato, coincidiendo de nuevo también con elevadas temperaturas ambientales (figura 7.43). Entre el primer y segundo día tras el evento lluvioso se produce la principal caída en las pérdidas, que a partir de ese momento va decreciendo poco a poco hasta alcanzar valores mínimos cercanos a los detectados en los días 20 a 23 de julio.

Si se estudian las temperaturas superficiales exteriores del sustrato y vegetación se puede observar que la disponibilidad de agua junto a las elevadas temperaturas fomenta un aumento de las pérdidas de calor por evapotranspiración, consiguiendo que las temperaturas superficiales exteriores el día 27 sean las menores del periodo analizado, a pesar de la elevada temperatura ambiental de ese día. Además, los días 26 (en el que se producen las lluvias) y 27 son los únicos en los que la temperatura máxima de la vegetación es igual o superior a la del sustrato. El día 27 la temperatura máxima del sustrato es de  $43,3^{\circ}C$  y la de la vegetación es de  $43,6^{\circ}C$ , mientras que la temperatura superficial del modelo A es de  $54,9^{\circ}C$ .

La figura 7.43 ilustra que el mecanismo de evapotranspiración está funcionando correctamente tras las lluvias del día 26, aumentando las pérdidas de calor por evapotranspiración en las capas de sustrato y vegetación, consiguiendo así temperaturas máximas superficiales  $11,6^{\circ}C$  y  $11,3^{\circ}C$  por debajo de la temperatura superficial máxima en la superficie del modelo A. Todo ello a pesar de la mortalidad, poca cobertura y elevado LAI del sustrato más expuesto.

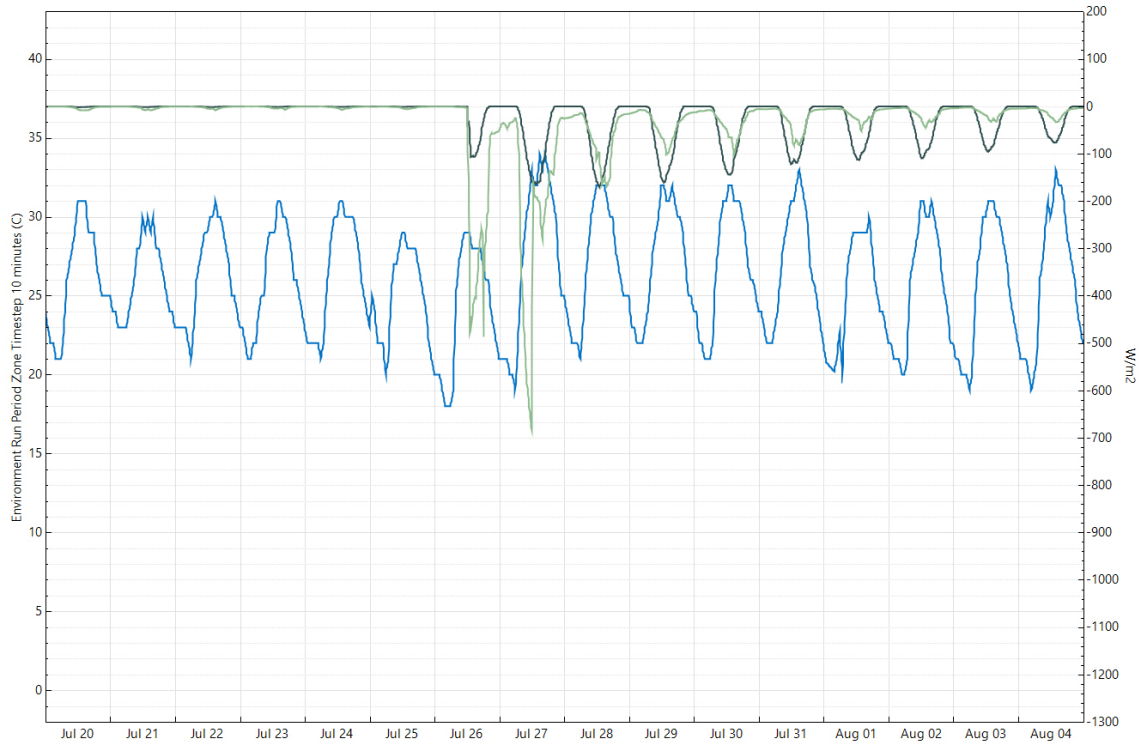


Figura 7.43. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 20 de julio a 4 de agosto.

Por lo tanto, un mínimo aporte de riego, tal y como se comenta en el apartado 6.6.3, para asegurar la supervivencia de la vegetación pero sin comprometer el consumo limitado de agua debido a la escasez hídrica implicará una mejora térmica y energética en el comportamiento del modelo B. El consumo energético total anual conseguido con el modelo B autosuficiente ya es muy similar al del modelo A, tan solo 50 kWh/año por encima, por lo que, un mínimo aporte de agua conseguirá valores de consumo inferiores a los del modelo A.

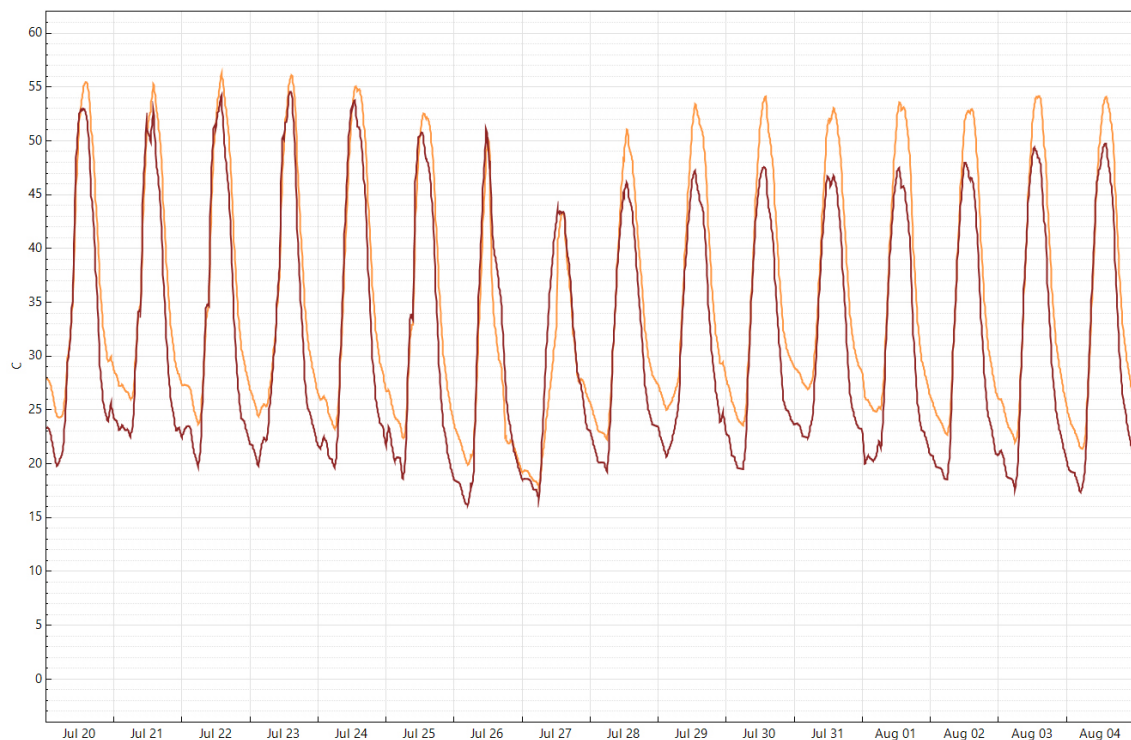


Figura 7.44. Temperatura superficial exterior ( $^{\circ}C$ ) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B durante los días 20 de julio a 4 de agosto.



En relación con la temperatura superficial interior (amarillo) de la cubierta del modelo B, estas mayores temperaturas superficiales exteriores (tanto máximas como mínimas) en los días 20 a 23 de julio se traducen en valores más elevados (Figura 7.45). La máxima temperatura superficial interior el día 22 es de 28,1 °C y la mínima de 26,4 °C, registros 0,3 °C y 0,4 °C mayores a los valores del modelo A, respectivamente. A pesar de que la amplitud térmica del día 22 en la superficie exterior del modelo B es 0,4 °C mayor que en el modelo A, la variación térmica diaria de la superficie interior es 0,1 °C menor en el modelo B que en el modelo A. Al igual que ocurría en el modelo A, el incluir aislamiento térmico en la cubierta se limitan los flujos de calor negativos, pero en el caso del modelo B se debe considerar además la inercia aportada por la capa de sustrato. En épocas cálidas y secas el sustrato contiene un menor grado de humedad, por lo que su conductividad térmica se verá reducida, limitando la transmisión de calor al interior. Aun así, estas temperaturas superficiales interiores máximas y mínimas ligeramente superiores a las del modelo A explican el mayor consumo energético de refrigeración que se produce en el modelo B.

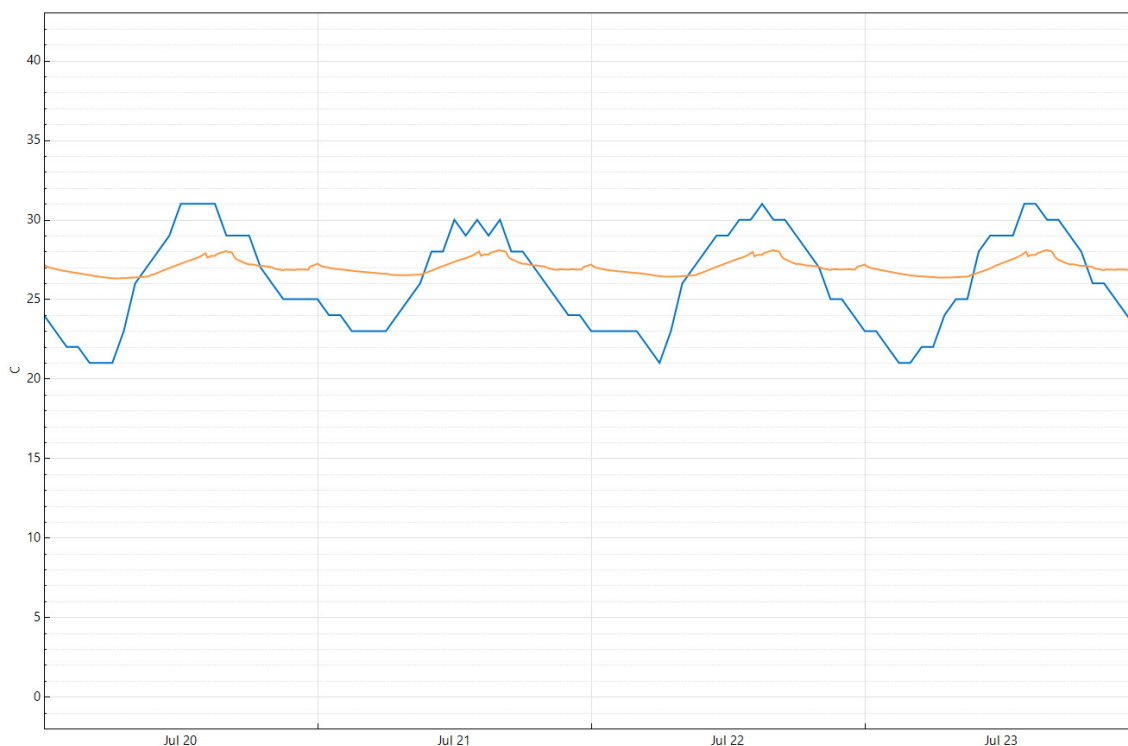


Figura 7.45. Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo B en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

Por último, analizando el comportamiento del modelo C, este ya se asemeja más al esperado de una cubierta ajardinada, ya que la espesa capa de vegetación (LAI=5), el valor de albedo ligeramente elevado (0,3), la altura de la vegetación y la mayor capacidad de almacenamiento de agua en el sustrato de mayor espesor favorecen que a pesar de encontrarnos en un clima cálido y seco, con elevadas temperaturas y radiación solar, las temperaturas superficiales exteriores del sustrato y vegetación sean las más bajas de los modelos estudiados.

El mayor albedo de la vegetación favorece que esta tenga una temperatura superficial menor que en el caso de la vegetación de la cubierta B, ya que absorbe menor cantidad de radiación solar. Además, la vegetación instalada en este modelo C no tiene la capacidad de regular la apertura de sus estomas, por lo que las pérdidas de calor por evapotranspiración serán mayores que en la capa de vegetación tipo *sedum* del modelo B, también debido a que la cubierta ajardinada intensiva almacena mayor cantidad de agua.

La temperatura máxima superficial en el exterior del sustrato (amarillo) el día 22 es de 36,8 °C, mientras que la temperatura superficial máxima de la vegetación (rojo) es de 33 °C (Figura 7.46). Tal y como se ha comentado, nos encontramos en un periodo de elevadas temperaturas ambientales junto con escasas precipitaciones. Esto, junto a las mayores demandas de agua para sobrevivir de la vegetación del modelo C, implican una mayor mortalidad y limitación de su crecimiento (véase apartado 6.5), por lo que el sustrato





queda más expuesto, hecho que justifica las temperaturas superficiales  $3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura superficial de la vegetación. Aun así, la vegetación superviviente sigue produciendo una sombra densa sobre el sustrato y el propio sustrato es capaz de almacenar más agua que puede emplear en parte para disipar el calor por evaporación. Por ello su temperatura superficial máxima del día 22 es  $15,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor que la temperatura superficial del modelo A y  $19,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor que la temperatura superficial del sustrato del modelo B. En el caso de la vegetación del modelo C, su mayor albedo en relación con el *sedum* del modelo B, la incapacidad de regular la apertura de sus estomas y la mayor disponibilidad de agua justifican una temperatura superficial máxima de la vegetación  $21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor en el modelo C que en el modelo B.

Respecto a la variación térmica del sustrato el día 22 esta es de  $16,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , siendo  $11,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor que en los modelos de referencia, A y B, respectivamente. Se trata de la variación térmica más cercana a la variación térmica ambiental ( $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). En relación con la temperatura superficial exterior mínima del sustrato el día 22, es de  $20,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , valor similar al de la superficie del modelo A (gravas de color claro con un mayor albedo y menor absorción de radiación solar) y  $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  menor que la superficie del sustrato del modelo B.

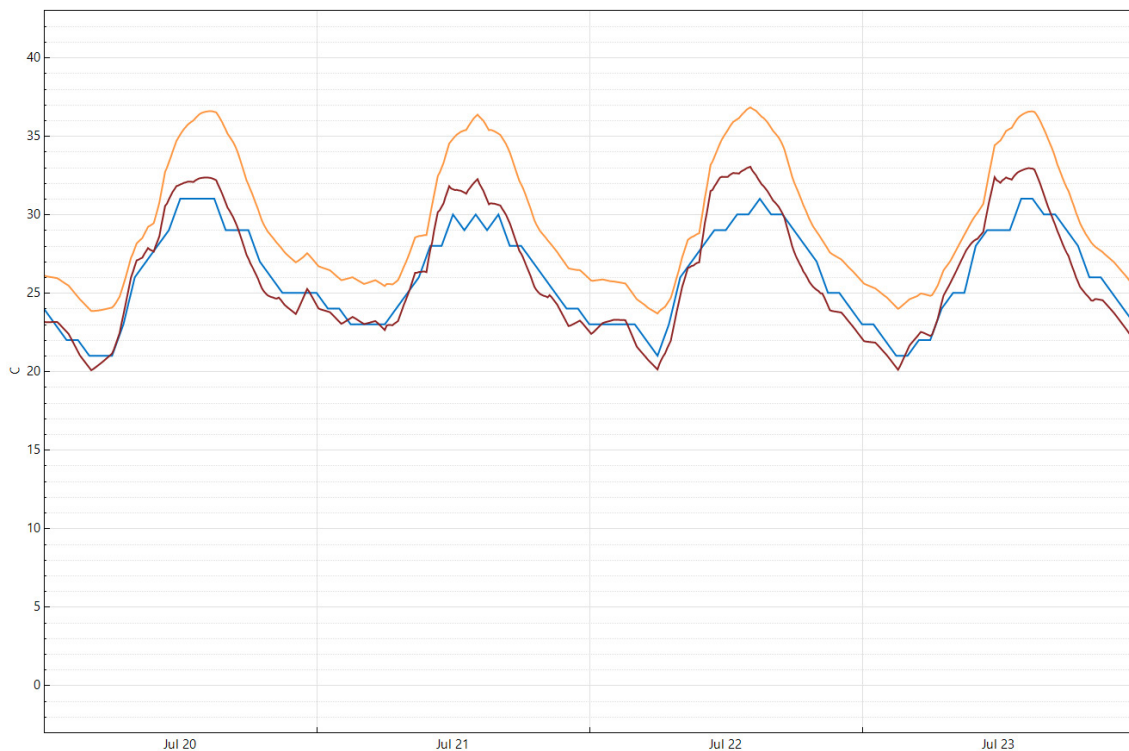


Figura 7.46. Temperatura superficial exterior ( $^{\circ}\text{C}$ ) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

De la figura 7.47 se pueden sustraer dos factores que justifican los datos comentados anteriormente, tal y como se ha indicado. En primer lugar, la mayor capacidad de almacenamiento de agua de la cubierta ajardinada intensiva, que dispone de una capa de sustrato  $50\text{ cm}$  superior a la del modelo B. Las máximas pérdidas de calor por evaporación diarias en el sustrato se sitúan entre los  $-23\text{ W/m}^2$  y  $-40\text{ W/m}^2$ . A pesar de que las condiciones ambientales son las mismas (escasas precipitaciones, elevadas temperaturas ambientales y radiación solar), las pérdidas de calor por evaporación en el sustrato son casi tres veces mayores en el modelo C que en el modelo B. En el caso de la vegetación se puede apreciar la influencia no solo de la mayor disponibilidad de agua, sino también de la incapacidad de limitar la apertura de los estomas en épocas de estrés hídrico. Las elevadas pérdidas de calor por evapotranspiración en la capa de vegetación justifican las temperaturas superficiales tan bajas en esta capa (muy similares a la temperatura ambiente). Los valores máximos de pérdidas de calor por evapotranspiración en los días del 20 a 23 de julio se sitúan entre los  $-539\text{ W/m}^2$  y  $-490,2\text{ W/m}^2$ . Si se compara con los  $-2\text{ W/m}^2$  alcanzados por las máximas pérdidas de calor por evapotranspiración en la vegetación del modelo B, queda clara y justificada la diferencia de  $21,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre las temperaturas superficiales exteriores máximas de ambas capas de vegetación el día 22.

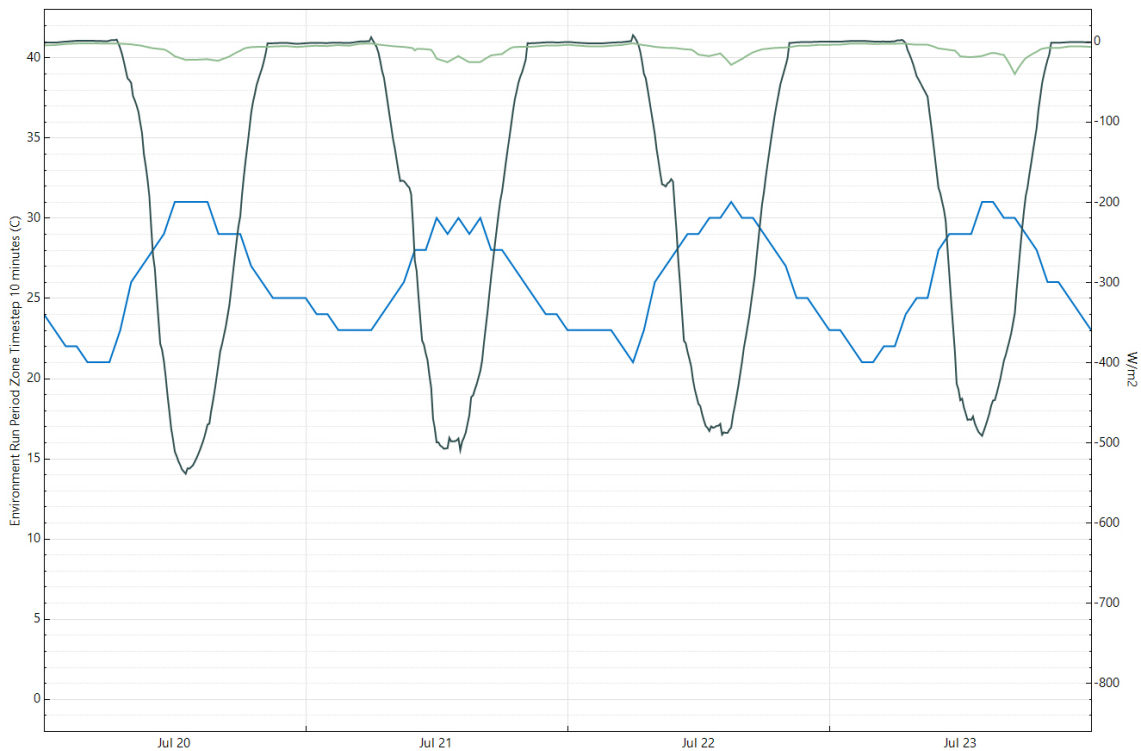


Figura 7.47. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

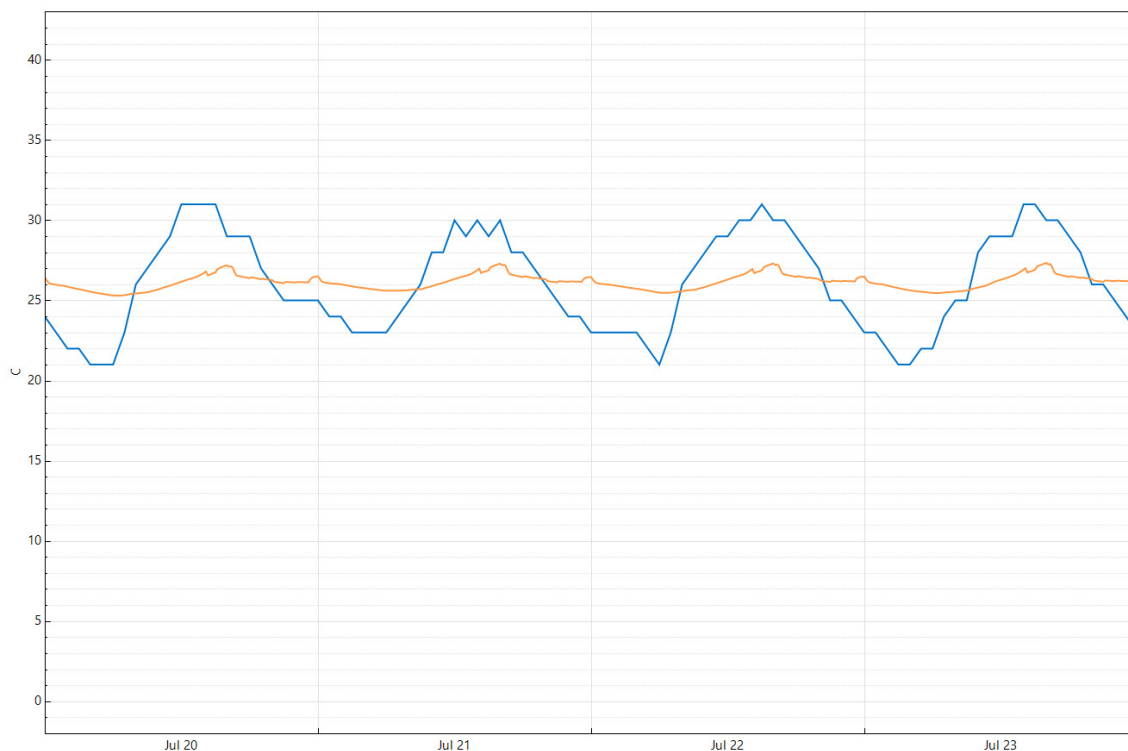


Figura 7.48. Temperatura superficial interior ( $^{\circ}C$ ) de la cubierta del modelo C en amarillo y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 20 a 23 de julio.

La limitación de las variaciones térmicas diarias en la superficie del sustrato y vegetación, así como las temperaturas máximas superficiales exteriores más bajas de entre los modelos estudiados, también minimiza los flujos de calor a través de la cubierta, sumado a la mayor inercia térmica aportada por la capa de sustrato de 60 cm. En este caso, al analizar las temperaturas superficiales interiores (amarillo) de la cubierta del modelo C, se aprecia una menor variación térmica diaria (Figura 7.48). En el periodo estudiado la máxima temperatura superficial interior es de  $27,3^{\circ}C$  y la mínima de  $25,3^{\circ}C$ , con una variación térmica el día



22 de 1,8 °C, similar a la de los modelos A y B (1,8 °C y 1,7 °C, respectivamente). Pero en el caso del modelo C, las temperaturas superficiales interiores se encuentran más próximas a la temperatura de consigna de refrigeración (25 °C). Esto explica que el consumo energético de refrigeración del modelo C sea el menor de entre los modelos estudiados. Esto repercute en el comportamiento global de esta cubierta, a pesar del tipo de clima y la inexistencia de un sistema de riego, presentado el mayor ahorro anual de energía total. Una mayor disponibilidad de agua aumentaría el ahorro conseguido con este sistema, diferenciándolo todavía más del resto, especialmente del modelo A sin ajardinar.

En este caso, al comparar con los datos obtenidos de las sondas superficiales de las maquetas en un día cálido característico, se observa una mayor variabilidad en los resultados (véase apartado 6.6.2.1). En el caso de las maquetas, la sonda A4 registró la temperatura superficial máxima más baja, con 43,5 °C, mientras que las sondas B4 y C5 detectaron temperaturas máximas similares (45,6 °C y 45,95 °C, respectivamente).

En cambio, en las simulaciones energéticas la menor temperatura máxima superficial del substrato se registra en el modelo C, 16 °C menor que la temperatura superficial en el modelo A y 19,5 °C menor que en la superficie del substrato del modelo B. El modelo B, tanto en las simulaciones como en los datos obtenidos por las sondas presenta la máxima temperatura superficial, debido a las especificaciones de la vegetación, como ya se ha comentado. En cambio, el modelo C es el que presenta mayor variabilidad en su comportamiento, siendo el que registra la máxima temperatura superficial más elevada en los datos de las sondas y la más baja en las simulaciones energéticas.

En el caso de la simulación, iniciada el 1 de enero de 2021, a principios del mes de agosto la vegetación lleva implantada ya siete meses, habiendo pasado la primavera, que es la época con mayores precipitaciones (véase apartado 6.6.2 y tabla II.1). La vegetación, por lo tanto, se encuentra en mejor estado que en las maquetas, a pesar del estrés hídrico propio del verano. En el caso de las maquetas, la implantación de la vegetación a tres meses del inicio del verano no permitió que esta se desarrollara lo suficiente, presentando en el mes de julio una mayor mortalidad y menor cubrición (véase apartado 6.5.2). Esto, unido a la elevada radiación solar que se produce en estos meses de verano, provoca que el substrato más expuesto del modelo de maqueta C presente temperaturas superiores a los datos obtenidos en la simulación energética. El modelo B presenta una vegetación suficientemente desarrollada en la maqueta en el mes de julio, hecho que justifica que su comportamiento sea similar tanto en los datos de las sondas como en la simulación energética.

Por lo tanto, el estado de la vegetación es importante a la hora de conseguir un buen funcionamiento de las cubiertas ajardinadas. Un mínimo aporte de riego que asegure la correcta implantación de la vegetación y su supervivencia es necesario, tal y como se ha mencionado, al mismo tiempo que escoger bien el tipo de vegetación. Como se ha indicado, la vegetación del modelo B ha presentado un mejor comportamiento en las condiciones adversas de una cubierta ajardinada, además de requerir menor cantidad de agua para su supervivencia. Esto, sumado a su menor peso propio y coste de construcción, hace del modelo B, especialmente si se mejora la disponibilidad de agua y las pérdidas de calor por evapotranspiración, la solución de cubierta más sostenible y adecuada para asegurar una mejora en el rendimiento energético de la vivienda.

### **7.3.2.2.3 Análisis del consumo de energía primaria y las emisiones de CO<sub>2</sub>**

En este caso, se toma el mismo coeficiente de paso de energía final a energía primaria que en el supuesto de rehabilitación anterior (solo cubierta), ya que la fuente de energía y la ubicación geográfica no se han modificado, manteniéndose el valor de 2,368. En la tabla 7.33, se detallan los consumos anuales totales y por m<sup>2</sup>, siendo este último el que emplearemos para comparar con el valor límite establecido por normativa para la zona climática correspondiente (80 kWh/m<sup>2</sup> año).

A pesar de haber realizado una mejora de todos los elementos de la envolvente, los cuales cumplen con el límite de transmitancia térmica establecida por el CTE DB-HE, se sigue superando el límite establecido para el consumo de energía primaria. En el caso de que se empleara electricidad convencional de fuentes renovables (coeficiente de 0,414), por la instalación, por ejemplo, de paneles solares que autoabastezcan la vivienda, el consumo de energía total primaria sería el indicado en la tabla 7.34, cumpliendo ya con el límite.



CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de energía final anual	11 775,09	9702,86	9752,86	9286,18
Consumo de energía primaria total	27 883,41	22 976,37	23 094,77	21 989,67
Consumo de energía primaria total por m <sup>2</sup>	361,18	297,62	299,16	284,84

Tabla 7.33. Consumo anual de energía final y primaria tota (kWh/año), y consumo anual de energía primaria total por m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup> año).

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de energía final anual	11 775,09	9702,86	9752,86	9286,18
Consumo de energía primaria renovable	4874,89	4016,98	4037,68	3844,48
Consumo de energía primaria renovable por m <sup>2</sup>	63,15	52,03	52,30	49,80

Tabla 7.34. Consumo anual de energía final y primaria renovable (kWh/año), y consumo anual de energía primaria renovable por m<sup>2</sup> (kWh/m<sup>2</sup> año).

Como conclusión, la simple mejora de los sistemas constructivos, aunque implique una reducción en el consumo energético, no es suficiente para conseguir cumplir con los límites establecidos en la normativa actual. Así, será necesario, por ejemplo, aumentar el uso de fuentes de energía renovables, emplear sistemas como la aerotermia o mejorar el diseño de la vivienda. Como se ha expuesto, de acuerdo con la ubicación y orientación de la vivienda, el diseño de elementos de control solar, el uso de técnicas constructivas que permitan disipar el calor acumulado en los elementos de la envolvente (por ejemplo, la fachada con cámara de aire ventilada) o el aumento de la ventilación natural en momentos que esta sea favorable permitirían mejorar la eficiencia energética de la vivienda y reducir su consumo de energía final y primaria. Por otro lado, el uso de equipos eléctricos, iluminación y sistemas de climatización más eficientes y con un menor consumo energético también ayudará a reducir este valor, como por ejemplo, la aerotermia.

La equivalencia de los valores de consumo anual de energía final a kilogramos equivalentes de CO<sub>2</sub> (kg CO<sub>2</sub>) se realiza mediante el mismo coeficiente que se ha empleado en el caso de rehabilitación de solo cubierta (Tabla 7.35). Es decir, un coeficiente de 0,331, ya que la fuente de energía primaria y la ubicación geográfica no varían. No debe olvidarse que hay gran cantidad de beneficios ambientales y sociales difíciles de cuantificar en las cubiertas ajardinadas pero que las hacen soluciones más sostenibles, más allá del ahorro energético conseguido y las emisiones de CO<sub>2</sub> reducidas (véase apartado 7.3.2.1.2)

CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año) Y EMISIONES DE CO <sub>2</sub> ANUALES (kg CO <sub>2</sub> )				
	Modelo referencia	Modelo A	Modelo B	Modelo C
Consumo de energía final anual	11 775,09	9702,86	9752,86	9286,18
Emisiones de CO <sub>2</sub> anuales	3897,55	3211,65	3228,20	3073,73

Tabla 7.35. Consumo anual de energía final (kWh/año) y emisiones de CO<sub>2</sub> anuales producidas por el edificio de acuerdo con este consumo (kg CO<sub>2</sub>).

### 7.3.2.3 Análisis económico

En ambos casos de rehabilitación se consigue, con los modelos A, B y C, un ahorro energético que se puede traducir, mediante la tarifa de luz, en un ahorro económico anual, es decir, en una reducción de la factura de la luz anual de los usuarios de las viviendas (Tabla 7.36). El valor de la tarifa de la luz se toma de los datos aportados por Eurostat para el primer semestre de 2021 (últimos datos disponibles en el momento de la consulta: julio 2022)<sup>56</sup>. Como el consumo anual de la vivienda, en todos los modelos, se sitúa entre los

<sup>56</sup> Eurostat. 2022.



5000 y 15 000 kWh, se toma este rango de consumo doméstico, siendo la tarifa en este caso de 0,1869 €/kWh (incluye tasas e impuestos).

	CONSUMO TOTAL (kWh/año)	COSTE ECONÓMICO ANUAL EN ELECTRICIDAD (€)	AHORRO ECONÓMICOS RESPECTO AL CASO SOLO CUBIERTA (€)	AHORRO ECONÓMICOS RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (€)
Modelo de referencia	11 775,09	2200,76	-	-
Modelo A_Cubierta	10 608,42	1982,71	-	218,05
Modelo A_Envolvente	9702,86	1813,46	169,25	387,30
Modelo B_Cubierta	10 611,20	1983,23	-	217,53
Modelo B_Envolvente	9752,86	1822,81	160,42	377,95
Modelo C_Cubierta	10 505,64	1963,50	-	237,25
Modelo C_Envolvente	9286,18	1735,59	227,91	465,17

Tabla 7.36. Consumo total anual (kWh/año) para cada modelo, coste económico anual en electricidad y ahorro económico (€).

El ahorro económico anual conseguido tras rehabilitar solo la cubierta con los modelos A, B y C presenta un valor de 218,05 €, 217,53 € y 237,25 €, respectivamente, en comparación con el coste económico anual de la energía consumida por el modelo de referencia. En el caso de rehabilitar toda la envolvente, el ahorro energético obtenido es de 387,30 € para el modelo A, 377,95 € para el modelo B y 465,17 € para el modelo C. Se observa también que las tres soluciones constructivas de cubierta presentan un ahorro muy similar en el caso de rehabilitar únicamente la cubierta. En el caso de rehabilitar la totalidad de la envolvente el ahorro económico es muy similar entre los modelos A y B, siendo relevantemente superior en el caso del modelo C.

Si se estudia la influencia de la cubierta respecto al ahorro energético obtenido al rehabilitar la totalidad de la envolvente en València, tal como se ha desarrollado en el apartado 7.3.1, podemos extraer de la tabla 7.37 que, en primer lugar, los porcentajes de influencia en el ahorro energético respecto al modelo de referencia son muy similares entre València y Sevilla, ambas ciudades ubicadas en la zona climática B.

AHORRO ENERGÉTICO (%)		
	València	Sevilla
Modelo A_Envolvente	17,60	19,47
Modelo A_Cubierta	9,91	10,83
Modelo A_Influencia	56,31	55,62
Modelo B_Envolvente	17,17	16,67
Modelo B_Cubierta	9,88	11,12
Modelo B_Influencia	57,54	66,71
Modelo C_Envolvente	21,14	19,06
Modelo C_Cubierta	10,78	11,72
Modelo C_Influencia	50,99	61,49

Tabla 7.37. Porcentaje (%) de ahorro energético respecto al consumo de energía final anual del modelo de referencia para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente y solo cubierta. En cada caso, se determina la influencia (%) de la cubierta en cada sistema constructivo (A-B-C) respecto a toda la envolvente.

De acuerdo con las conclusiones expuestas en el apartado 7.3.1, en València, al tratarse de una ciudad con mayor temperatura ambiente y elevados valores de radiación solar, la mejora de la inercia térmica de la cubierta supone un ahorro energético importante, siendo mayor al 50 % del ahorro obtenido al rehabilitar toda la envolvente. Se debe considerar además que el coste de construcción del proyecto de rehabilitar energéticamente solo la cubierta es, en valores orientativos, un 16,7 % del coste de rehabilitar la totalidad de la envolvente. Se debe tener en cuenta que en el campo de la rehabilitación el coste económico de los



proyectos es un factor muchas veces decisivo y determinante en la elección de los sistemas constructivos a emplear y que mejoras realizar. Por ello, en la ciudad de València, debido a los datos aportados, la rehabilitación solo de la cubierta podría plantearse como una fase inicial del proyecto de rehabilitación, mejorando sustancialmente el comportamiento energético de la vivienda, especialmente si se combina con otros mecanismos, como la instalación de placas solares o el diseño de elementos de control solar.

En la tabla 7.36 se observa que el modelo ajardinado extensivo (B) presentan un ahorro energético y económico muy similar al del modelo A, mientras que el modelo de cubierta ajardinada intensiva (C) consigue un ahorro superior a estos dos modelos. Pero cabe destacar que tan solo se ha considerado el ahorro económico, dejando de lado en este estudio los beneficios sociales y ambientales, ampliamente descritos (véase apartado 3.1 y 3.2), pero mucho más difíciles de valorar económicamente. Si se consideran los tres aspectos de la sostenibilidad las cubiertas ajardinadas destacarían más todavía sobre la solución sin ajardinar y con acabado de grava (modelo A), planteándose las opciones B y C como más adecuadas. Es por ello que se prosiguen las conclusiones comparando los modelos ajardinados extensivo (B) e intensivo (C).

De acuerdo con los datos aportados para cada uno de los modelos en el apartado 6.1.1, a partir de los cálculos detallados en el Anexo I, el coste de construcción por  $m^2$  de las dos opciones ajardinadas es de 170,45 €/m<sup>2</sup> para el modelo B (con 6,5 cm de XPS) y 285,80 €/m<sup>2</sup> para el modelo C en el caso de tener que ejecutar toda la cubierta, incluido el forjado. En el caso de que el elemento estructural y la formación de pendientes estén en buen estado el coste de la instalación de la lámina impermeable y las capas superiores sería de 86,98 €/m<sup>2</sup> para el modelo B y 202,33 €/m<sup>2</sup> para el modelo C. En la tabla 7.38 se indica el coste de construcción de ambos modelos para la totalidad de la cubierta (77,2 m<sup>2</sup>) y el peso propio en el caso de rehabilitación sobre la capa de formación de pendientes, así como el coste económico anual en electricidad y el ahorro anual en energía final total en el caso de rehabilitar tan solo la cubierta.

	MODELO B	MODELO C
Coste de construcción total (€)	6714,86	15 619,88
Peso propio (daN)	12 455,45	71 812,98
Coste económico anual en electricidad (€)	1983,23	1963,50
Ahorro anual en energía final (kWh/año)	1163,89	1269,45

Tabla 7.38. Coste de construcción (€) y peso propio (daN) para toda la superficie de la cubierta en los modelos B y C, junto al coste económico anual en electricidad (€) y al ahorro anual en energía final respecto al modelo de referencia (kWh/año).

El coste de construcción, sea cual sea el modelo de rehabilitación, es 8905,02 € más elevado en el modelo C que en el modelo B (un 132,62 % más), mientras que el peso propio de la solución ajardinada intensiva (C) es 59 357,53 daN (o simplificada mente kg) más pesada que el modelo extensivo (B) (un 476,56 % más). Mientras, el coste económico anual en electricidad es más elevado en el modelo B, pero en un valor casi despreciable: 19,73 € más que en el modelo C, un 1 %. La diferencia en el ahorro en energía final respecto al modelo de referencia al rehabilitar solo la cubierta es de nuevo mínima, siendo el ahorro un 9,07 % más elevado en el modelo C. Además, cabe destacar que en esta investigación se han estudiado cubiertas ajardinadas sin riego (autosuficientes). En caso de existir riego, aunque sea para un aporte mínimo, el coste de este sistema debería incluirse en el coste de construcción inicial y a los beneficios económicos anuales obtenidos habría que restar los costes de consumo de agua anual. Es por ello que, aunque el aporte de riego sería necesario para la supervivencia y funcionamiento de la vegetación, en favor del comportamiento energético de la cubierta ajardinada, debe de ser mínimo, por cuestiones tanto ambientales como económicas.

Por lo tanto, se consigue un ahorro energético y económico muy similar entre los modelos ajardinados extensivo e intensivo autosuficientes, en un clima cálido y con elevada radiación solar, tras la rehabilitación de la cubierta. En cambio, el coste de construcción y el peso propio del modelo C (intensivo) son mucho mayores a los del modelo B (extensivo), además de necesitar mayor aporte de agua para la supervivencia de la vegetación del sistema intensivo. Es por ello que el modelo B destaca como la opción más viable en el campo de la rehabilitación.



Para el caso de la cubierta ajardinada extensiva (modelo B) se procede a calcular cuánto tiempo se tardaría en recuperar la inversión inicial realizada para su construcción, considerando el caso de rehabilitación solo de cubierta. Se considera que las tarifas de electricidad aumentarían un 3 % anual<sup>57</sup>. Para ello empleamos la fórmula del VAN (Valor Actual Neto) que consiste en un criterio de inversión que, a partir de los cobros y pagos actualizados de un proyecto o inversión, permite conocer que cantidad de dinero se va a poder ganar o perder (es decir, permite saber si será rentable o no y cuando).

$$\text{VAN} = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} = -I_0 + \frac{F_1}{(1+k)} + \frac{F_2}{(1+k)^2} + \dots + \frac{F_n}{(1+k)^n}$$

Siendo  $I_0$  la inversión inicial (a tiempo  $t=0$ ) respecto al modelo de referencia; ( $F_1, F_2, \dots, F_t$ ) los flujos económicos, es decir el ahorro económico en cada periodo  $t$  (en cada año) respecto al modelo de referencia; y  $k$  el tipo de descuento o interés (considerado en este caso una tasa de descuento del dinero del 3 %, es decir, que se devalúa).

$$\text{VAN}_B \text{ a 32 años} = -6714,86 + \frac{217,53}{(1+0,03)} + \frac{224,06}{(1+0,03)^2} + \frac{230,78}{(1+0,03)^3} + \dots + \frac{543,85}{(1+0,03)^{32}} = 43,39\text{€}$$

Esto quiere decir que se tardarían 32 años en recuperar la inversión inicial de la cubierta ajardinada extensiva, produciendo en este último año un beneficio de 43,39 €, solo considerando los beneficios económicos obtenidos con el ahorro energético y con una tasa de descuento del dinero del 3 %. Cabe destacar que si el coste de los materiales y la mano de obra se reduce (porque se estandariza este sistema constructivo y se regulan sus precios), si se aplican incentivos económicos desde la administración pública (reducción de impuestos, ayudas iniciales para la instalación de cubiertas ajardinadas, etc.) y/o si el coste de la energía aumenta más del 3 % anual esta solución sería rentable a mucho menor plazo de tiempo.

Si, por ejemplo, se aplica la devolución del 20 % del coste total de instalación de la cubierta ajardinada, como reciben los dueños de edificios que deciden instalarlas en Basilea (Suiza)<sup>58</sup>, el coste inicial de instalación de la cubierta extensiva para el usuario, después de descontar la ayuda, sería de 5371,89 €. En este caso, y manteniendo el resto de las condiciones anteriores, la inversión inicial se recuperaría a los 26 años, produciendo en ese año un beneficio de 119,19 €.

$$\text{VAN}_{B2} \text{ a 26 años} = -5371,89 + \frac{217,53}{(1+0,03)} + \frac{224,06}{(1+0,03)^2} + \frac{230,78}{(1+0,03)^3} + \dots + \frac{455,46}{(1+0,03)^{26}} = 119,19\text{€}$$

La instalación de una cubierta tradicional de grava resulta, si tan solo se toma una perspectiva monetaria, es más económica que cualquiera de los modelos ajardinados, con un coste de construcción, en el caso de sustituir únicamente la lámina impermeable y las capas superiores, de 41,33 €/m<sup>2</sup>, siendo el coste de la totalidad de la cubierta de 3190,68 €. En este caso se recuperaría la inversión inicial en un plazo de 16 años, produciendo en ese año un beneficio de 195,51 €.

$$\text{VAN}_A \text{ a 16 años} = -3190,68 + \frac{218,05}{(1+0,03)} + \frac{224,59}{(1+0,03)^2} + \frac{231,33}{(1+0,03)^3} + \dots + \frac{339,72}{(1+0,03)^{16}} = 195,51\text{€}$$

En este caso, a mayores ayudas o bonificaciones dirigidas al uso de las cubiertas ajardinadas, más se asemejan los valores de rendimiento al caso de instalar una cubierta tradicional sin ajardinar (A). Debido a que gran parte de los beneficios ambientales o sociales no son cuantificables, aunque sí acaban repercutiendo a lo largo del tiempo sobre los usuarios de la ciudad, es importante que se produzca un proceso de concienciación. Es necesario el estímulo por parte de las administraciones públicas al empleo de soluciones constructivas u opciones de diseño más sostenibles y que minimicen los efectos del cambio climático, o incluso los revertan.

57 Fernández-Salvador, V. 2012.

58 Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M. 2018.



### 7.3.2.4 Las cubiertas ajardinadas en edificios de varias plantas

Se realizan las simulaciones empleando el modelo B, al considerarse el más viable en el campo de la rehabilitación, analizando la repercusión de la mejorar de la transmitancia térmica de la cubierta no solo en una vivienda unifamiliar de una planta, sino también en un edificio de 2 o más plantas (de acuerdo con la distribución indicada en el apartado 7.2). En este caso, se analiza el consumo energético de los modelos de referencia de 2 a 6 plantas y de los modelos, con las mismas alturas, tras rehabilitar solo la cubierta con el sistema ajardinado extensivo (B), obteniendo el ahorro energético conseguido tras esta mejora (Tablas 7.39, 7.40, 7.41, 7.42, 7.43 y 7.44).

1 PLANTA	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)		AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
	Modelo referencia	Modelo B	
Iluminación	172,22	172,22	-
Equipos eléctricos	4347,26	4347,26	-
Refrigeración	2183,35	1658,35	24,05
Calefacción	5072,26	4433,37	12,60
<b>TOTAL</b>	<b>11 775,09</b>	<b>10 611,20</b>	<b>9,88</b>

Tabla 7.39. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 1 planta.

2 PLANTAS	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)		AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
	Modelo referencia	Modelo B	
Iluminación	347,23	347,23	-
Equipos eléctricos	8694,51	8694,51	-
Refrigeración	6708,39	6063,94	9,61
Calefacción	7638,95	6913,94	9,49
<b>TOTAL</b>	<b>23 389,08</b>	<b>22 019,62</b>	<b>5,86</b>

Tabla 7.40. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 2 plantas.

3 PLANTAS	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)		AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
	Modelo referencia	Modelo B	
Iluminación	519,45	519,45	-
Equipos eléctricos	13 044,55	13 044,55	-
Refrigeración	11 975,10	11 341,76	5,29
Calefacción	10 480,64	9727,86	7,18
<b>TOTAL</b>	<b>36 019,74</b>	<b>34 633,62</b>	<b>3,85</b>

Tabla 7.41. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 3 plantas.

En la figura 7.49 se representa la disminución exponencial del ahorro energético, tanto para los consumos de refrigeración y calefacción como respecto al consumo de energía final total anual. La mayor diferencia entre ahorros se produce en los edificios de menor altura, conforme vamos aumentando de 1 hasta 3 plantas, mientras que, en el caso de alturas mayores, a partir de 4 plantas, el ahorro energético ya es más similar entre ellos.





4 PLANTAS	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)		AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
	Modelo referencia	Modelo B	
Iluminación	691,67	691,67	-
Equipos eléctricos	17 391,81	17 391,81	-
Refrigeración	17 641,81	17 061,25	3,29
Calefacción	13 216,77	12 438,99	5,88
<b>TOTAL</b>	<b>48 942,06</b>	<b>47 583,72</b>	<b>2,78</b>

Tabla 7.42. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 4 plantas.

5 PLANTAS	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)		AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
	Modelo referencia	Modelo B	
Iluminación	863,90	863,90	-
Equipos eléctricos	21 739,06	21 739,06	-
Refrigeración	23 502,97	22 966,85	2,28
Calefacción	15 927,91	15 139,01	4,95
<b>TOTAL</b>	<b>62 033,84</b>	<b>60 708,82</b>	<b>2,14</b>

Tabla 7.43. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 5 plantas.

6 PLANTAS	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL (kWh/año)		AHORRO RESPECTO AL MODELO DE REFERENCIA (%)
	Modelo referencia	Modelo B	
Iluminación	1038,90	1038,90	-
Equipos eléctricos	26 086,32	26 086,32	-
Refrigeración	29 414,12	28 911,34	1,71
Calefacción	18 672,37	17 866,81	4,31
<b>TOTAL</b>	<b>75 211,71</b>	<b>73 903,37</b>	<b>1,74</b>

Tabla 7.44. Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 6 plantas.

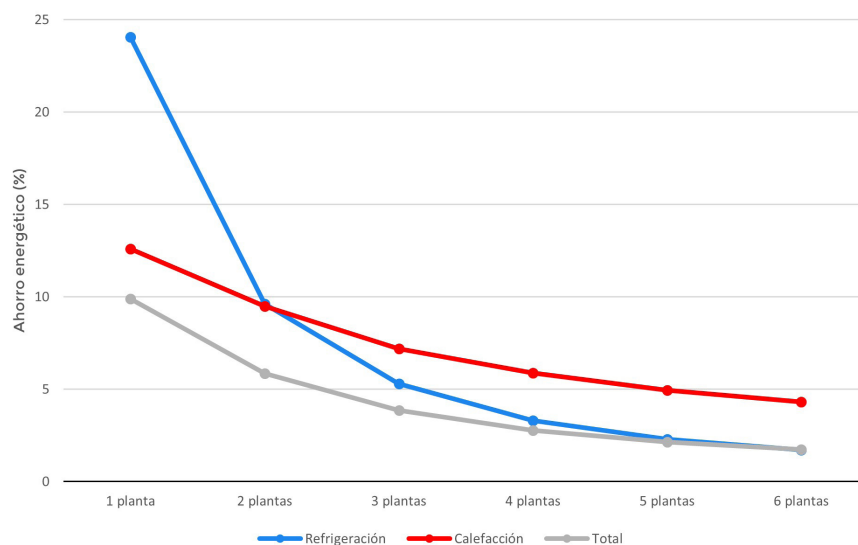


Figura 7.49. Ahorro en el consumo anual de refrigeración, calefacción y total (%) respecto al modelo de referencia, en edificios de 1 a 6 plantas.



La caída más pronunciada en el ahorro energético obtenido se produce en el caso del consumo anual de refrigeración, especialmente en el paso del edificio de 1 a 2 plantas. De hecho, solo en el caso del edificio unifamiliar de una planta, el ahorro conseguido tras la instalación de la cubierta ajardinada extensiva es mayor en el consumo energético de refrigeración que en el consumo de calefacción. En el edificio de dos plantas es muy similar el ahorro, mientras que a mayor número de plantas es mayor el ahorro obtenido en calefacción. Esto se puede deber a la orientación principal de la vivienda, con las principales fachadas orientadas a sur y oeste, además de disponer de carpinterías sin RPT y vidrios sin control solar, hecho que implica unas ganancias de calor mayores a través de estas fachadas. Al aumentar la altura de la vivienda se aumenta la superficie de las fachadas sur y oeste, así como el número de ventadas, mientras que la superficie de cubierta ajardinada extensiva que reduce el consumo de refrigeración sigue siendo la misma (77,2 m<sup>2</sup>). Aumentan tanto las ganancias de calor a través de las fachadas como el volumen interior a enfriar, pero la superficie de cubierta se mantiene constante. Esto explica que la disminución del ahorro en el consumo anual de refrigeración sea el más pronunciado de los tres al aumentar las plantas del edificio.

Al calcular el ahorro energético respecto al consumo anual total se considera toda la energía empleada en la vivienda, es decir, sistemas de climatización, iluminación y equipos eléctricos. Estos dos últimos consumos se mantienen constantes entre el modelo de referencia y el modelo rehabilitado con la cubierta B. Eso explica que el descenso que se produce en el ahorro energético respecto al consumo total al aumentar el número de plantas sea menos pronunciado.

Por lo tanto, la curva que representa el ahorro energético respecto al consumo de energía final total empieza a describir una trayectoria más plana a partir de la cuarta planta, siendo el ahorro energético respecto al modelo de referencia entorno al 2 %. Para un número de plantas superior a 5 se supondrá que la instalación de una cubierta ajardinada extensiva en rehabilitación no alcanzará un ahorro energético en el consumo total mayor al 2 %<sup>59</sup>.

### 7.3.3 Comportamiento energético de las cubiertas autosuficientes<sup>60</sup>

Tal y como se ha indicado en la descripción de los diferentes modelos de cubierta ajardinada (modelos B y C), estos serán autosuficientes, es decir, sin sistema de riego. En este caso, el agua disponible en el sustrato y la capa de vegetación es limitada, alterando el funcionamiento del mecanismo de evapotranspiración, principal herramienta de disipación de calor en la superficie de la cubierta ajardinada, y la supervivencia y estado de la vegetación. Desde un punto de vista energético, cabe profundizar en cómo afectará el agua disponible, en función de las precipitaciones de la zona y las condiciones térmicas y de radiación solar del emplazamiento, en la evapotranspiración de estas cubiertas.

Esta variación en el comportamiento influirá necesariamente en el consumo energético de la vivienda, pudiendo ser mayor al esperado para una cubierta ajardinada con riego, ya que menor disposición de agua implicará menores pérdidas de calor por evapotranspiración y una mayor temperatura superficial de la cubierta. Siguiendo el camino previo de esta investigación, se va a realizar el estudio de los factores climáticos más influyentes y su repercusión en el ahorro energético bajo el supuesto de rehabilitación integral de toda la envolvente, ya que se pretende profundizar en el mecanismo de evapotranspiración. Al analizar los dos casos de rehabilitación propuestos (solo cubierta y toda la envolvente) se obtendrían datos similares.

Dentro de este caso de rehabilitación integral se van a considerar tres supuestos en base a los tres sistemas constructivos de cubierta presentados en apartados anteriores: cubierta tradicional con acabado de grava (modelo A), cubierta ajardinada extensiva autosuficiente (modelo B) y cubierta ajardinada intensiva autosuficiente (modelo C). Se tomará como modelo de referencia la vivienda unifamiliar adosada descrita en apartados anteriores, sin aislamiento en la envolvente térmica. Todos los parámetros de modelización

59 Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á. *et al.* 2022b.

60 Los resultados de la investigación desarrollada en el apartado 7.3.3, en relación con el comportamiento particular de las cubiertas ajardinadas autosuficientes, han sido publicados en la revista *Buildings*, bajo el título “Energy efficiency evaluation of green roofs as an intervention strategy in residential buildings in the field of spanish climate” (Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., *et al.* 2022a.).



introducidos en el programa EnergyPlus y OpenStudio son los mismos detallados en el Anexo III, y las simulaciones se siguen realizando para todo un año natural completo (2021).

Debido a que las condiciones ambientales (temperatura, radiación solar y precipitaciones) van a determinar en gran medida el agua disponible y la evapotranspiración de estas cubiertas sin sistema de riego, se decide estudiar los casos anteriormente descritos en diferentes entornos climáticos. El territorio español, de acuerdo con la normativa actual, se divide en seis tipos diferentes de zonas climáticas y en otras cinco zonas pluviométricas de promedios. Para abarcar toda esta variedad de entornos climáticos se seleccionan ocho ciudades españolas que representan todas las zonas climáticas y pluviométricas de promedios (Figura 7.50, Tabla 7.45 y 7.46). Las zonas climáticas vienen determinadas por el CTE DB-HE, y se clasifican en  $\alpha$ -A-B-C-D-E, siendo  $\alpha$  el clima característico de las zonas costeras de las Islas Canarias, y repartidos en el resto del territorio desde A, más cálido, hasta E, más frío. En el caso de las cinco zonas pluviométricas de promedios (I-II-III-IV-V), estas se determinan en el CTE DB-HS y se clasifican en función del índice pluviométrico anual ( $p$ ): I ( $p > 2000$  mm)-II ( $2000 \text{ mm} \geq p > 1000$  mm)-III ( $1000 \text{ mm} \geq p > 500$  mm)-IV ( $500 \text{ mm} \geq p > 300$  mm)-V ( $p < 300$  mm).

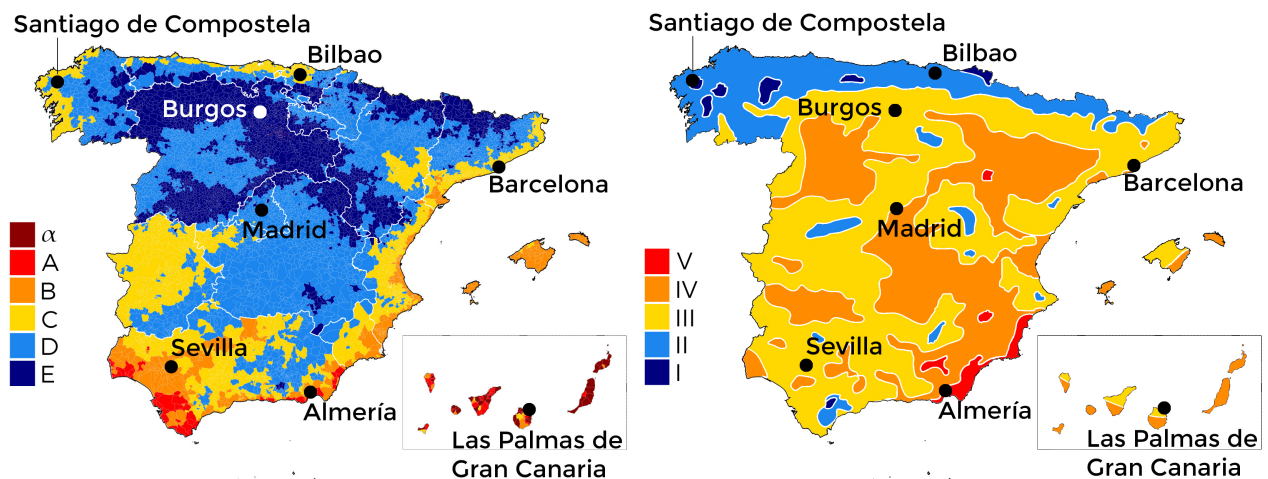


Figura 7.50. Mapa de zonas climáticas (izq.) y zonas pluviométricas de promedios (dcha.) en España, con ubicación de las ocho ciudades escogidas.

De acuerdo con la clasificación de zonas climáticas, en función de la temperatura ambiente y la radiación solar, en cada una de las ciudades será necesario cumplir con unos requisitos de transmitancia térmica de los elementos de la envolvente (véase tabla 7.6). Por lo tanto, los sistemas constructivos de los modelos rehabilitados se diseñarán para obtener una transmitancia menor al valor límite. En el caso concreto de las cubiertas, el espesor de material aislante irá variando para ajustarse a este requerimiento en cada uno de los modelos (A-B-C), tal como se indica en la tabla 7.47. Se observa que en ningún caso se diseñará una cubierta ajardinada sin una capa de material aislante, a pesar de que la capa de substrato pueda cumplir por sí misma con los requisitos térmicos de transmitancia. Se dispone, en estos casos, una capa de aislamiento térmico mínima de 3 cm, ya que se pueden producir variaciones en su conductividad térmica, en función de la cantidad de agua almacenada (véase apartado 6.6.2.3).

Una vez escogidas las ocho localizaciones y determinadas las particularidades asociadas a la transmitancia térmica de los diferentes elementos de la envolvente, se evalúa el comportamiento energético de la vivienda unifamiliar de referencia (sin aislamiento en la envolvente) y de los modelos A (cubierta con acabado de grava), B (cubierta ajardinada extensiva) y C (cubierta ajardinada intensiva) tras la rehabilitación de toda la envolvente térmica. En la figura 7.51 se representan los consumos anuales de energía final total de cada uno de los modelos en cada una de las ocho ciudades.



	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Las Palmas de Gran Canaria	19,7	19,6	19,4	19,3	19,2	19,1	19,1	19,6	20,6	21,6	22,5	23,0	23,3	23,4	23,3	23,1	22,7	22,1	21,3	20,7	20,4	20,2	20,0	19,8
Almería	17,6	17,3	17,0	16,7	16,5	16,3	16,4	17,0	18,2	19,8	21,0	21,8	22,3	22,6	22,7	22,5	22,1	21,5	20,6	19,7	19,0	18,5	18,2	17,9
Sevilla	16,6	16,0	15,5	15,1	14,7	14,4	14,3	14,8	15,8	17,5	19,3	20,9	22,4	23,5	24,1	24,9	24,9	24,4	23,4	21,9	20,3	19,3	18,3	17,3
Bilbao	12,6	12,4	12,2	12,1	12,0	11,8	11,9	12,4	13,3	14,7	16,1	17,2	17,9	18,3	18,4	18,2	17,7	17,0	16,0	15,1	14,3	13,8	13,3	12,9
Barcelona	16,1	15,8	15,5	15,3	15,1	15,0	15,1	15,5	16,3	17,1	17,9	18,6	19,0	19,3	19,3	19,2	18,9	18,5	18,0	17,5	17,1	16,8	16,6	16,3
Santiago de Compostela	10,6	10,3	10,1	9,9	9,8	9,8	10,0	10,7	12,0	13,2	14,3	15,6	16,2	16,5	16,8	16,5	15,8	15,0	13,9	12,8	12,1	11,5	11,1	10,8
Madrid	12,7	12,1	11,5	11,0	10,6	10,2	10,0	10,6	12,1	13,9	15,8	17,3	18,6	19,6	20,4	20,7	20,7	20,3	19,0	17,5	16,1	15,0	14,1	13,4
Burgos	8,5	8,2	7,8	7,5	7,3	7,0	6,9	7,4	8,6	10,1	11,7	13,2	14,4	15,2	15,8	16,0	15,8	15,1	14,1	12,7	11,3	10,2	9,4	8,9

Se indican las casillas con menor temperatura con azul oscuro y las de mayor temperatura con rojo oscuro. La transición se marca con azules y rojos más claros.

Tabla 7.45. Temperatura media anual por horas (°C) para cada ciudad.

	00:00	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
Las Palmas de Gran Canaria	0	0	0	0	0	0	0	10	94	298	482	589	646	659	662	660	612	491	290	92	7	0	0	0
Almería	0	0	0	0	0	9	174	384	600	688	721	729	713	678	617	519	360	179	52	4	0	0	0	0
Sevilla	0	0	0	0	0	0	131	328	524	641	678	687	675	645	596	518	387	222	76	6	0	0	0	0
Bilbao	0	0	0	0	0	19	120	234	360	437	466	477	469	443	394	318	223	127	46	7	0	0	0	0
Barcelona	0	0	0	0	0	48	179	324	484	562	594	599	582	545	481	373	240	118	33	3	0	0	0	0
Santiago de Compostela	0	0	0	0	0	2	98	222	344	441	458	454	437	412	370	295	188	88	24	2	0	0	0	0
Madrid	0	0	0	0	0	14	171	344	505	594	623	630	616	587	537	455	330	182	60	5	0	0	0	0
Burgos	0	0	0	0	0	14	125	252	387	481	517	527	517	490	444	367	264	153	57	9	0	0	0	0

Se indican las casillas con menor radiación solar en gris y las de mayor radiación solar con rojo oscuro. La transición se marca con rojos más claros.

Tabla 7.46. Radiación solar media anual por horas (W/m²) para cada ciudad.

En primer lugar, al igual que se ha hecho para la ciudad de València, se toman los datos aportados por IDAE<sup>61</sup> de consumos energéticos medios en el sector residencial español (véase tabla 7.15). En este caso, las ciudades escogidas se ubican en diferentes climas (Atlántico Norte, Continental o Mediterráneo), por lo que el consumo del modelo de referencia de cada una de ellas se compara con el valor de consumo energético medio para una vivienda unifamiliar en cada zona climática (Tabla 7.48). Todos los consumos obtenidos son similares a los indicados en el informe del IDAE. Dentro de la zona Mediterránea se engloban ciudades ubicadas en las zonas climáticas  $\alpha$ , A, B y C (de acuerdo con el CTE DB-HE). Para el clima con menores variaciones térmicas (ZC  $\alpha$ ) y el clima más cálido (ZC A) el consumo energético difiere más del consumo medio determinado en el informe (un 47,6 % y 20,2 %, respectivamente). Lo mismo ocurre en el caso de las otras dos zonas: en la zona del Atlántico Norte se ubican ciudades de las zonas climáticas C y D; y en la zona Continental se ubican ciudades de las zonas climáticas D y E.

61 IDAE. 2011.



CIUDAD	ZONAS CLIMÁTICAS	ZONAS PLUVIOMÉTRICAS DE PROMEDIOS	ESPESOR DE LA CAPA DE MATERIAL AISLANTE (cm)		
			A	B	C
Las Palmas de Gran Canaria	α	III	4,5	3,5	3,0*
Almería	A	V	5,5	4,5	3,0*
Sevilla	B	III	8,0	6,5	3,0*
Bilbao	C	II	12,5	11,0	7,5
Barcelona	C	III	12,5	11,0	7,5
Santiago de Compostela	D	I	13,0	11,5	8,0
Madrid	D	IV	13,0	11,5	8,0
Burgos	E	III	15,5	14,0	10,5

\* Mínimo espesor de la capa de material aislante en las cubiertas ajardinadas.

Tabla 7.47. Zona climática y pluviométrica de promedios de cada una de las ciudades. Espesor de la capa de material aislante (cm) de la cubierta en los modelos A, B y C.

Tal y como se ilustra en la figura 7.51, se consigue un ahorro energético, es decir, un menor consumo energético anual que el modelo de referencia con todos los modelos rehabilitados y en todas las ciudades, a excepción de Las Palmas de Gran Canaria. El caso particular de esta ciudad se justifica en base a su temperatura ambiente con menores variaciones diarias y anuales (véase apartado 7.3.1).

También se puede apreciar cómo, exceptuando el caso de Las Palmas de Gran Canaria, el ahorro energético conseguido por los modelos con cubierta ajardinada (B-C) es mayor respecto al modelo de referencia (sin aislamiento en la envolvente) que en comparación con el modelo A, cubierta sin ajardinar, pero con aislamiento. Al analizar los datos para Almería, por ejemplo, se ha obtenido un ahorro en el consumo de energía final total anual del 9,11 % en el modelo B respecto al de referencia. En cambio, respecto al modelo A, el modelo B implica un aumento del consumo (-3,78 %). En el caso del modelo C, el ahorro energético respecto al modelo de referencia es del 12,63 %, mientras que respecto al modelo A el ahorro es tan solo del 0,24 %.

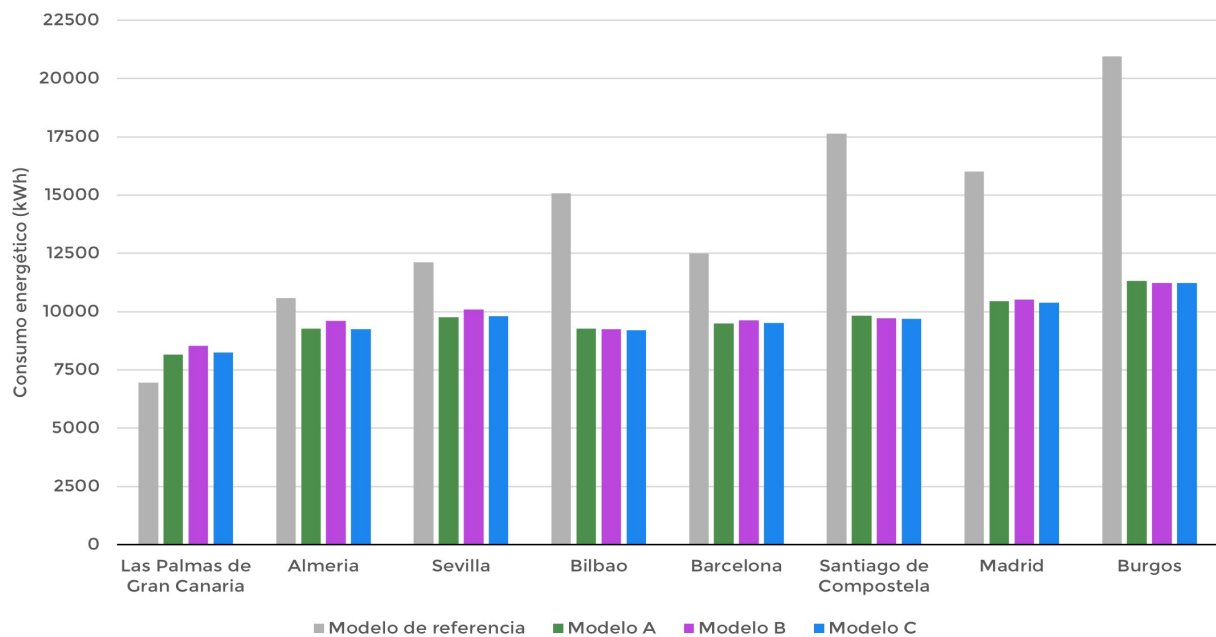


Figura 7.51. Consumo anual de energía final total (kWh) en el modelo de referencia y tras la rehabilitación, en los modelos A, B y C.

Al comparar los tres modelos rehabilitados entre sí, se concluye que el comportamiento de los modelos A (con acabado de grava) y C (cubierta ajardinada intensiva) es muy similar, para cualquiera de las ciudades. En cambio, el modelo B (cubierta ajardinada extensiva) presenta una mayor variabilidad de comportamien-



to. Esto se debe a una serie de factores que hacen que este modelo sea más susceptible a las condiciones exteriores de temperatura, radiación solar y precipitaciones (véase apartado 7.3.1):

- El menor espesor del sustrato.
- La vegetación es de poca altura (especies *sedum*).
- La vegetación no tiene un LAI elevado (LAI=0,8).
- La vegetación tiene la capacidad de regular la apertura de sus estomas.

CIUDAD	ZONAS CLIMÁTICAS CTE DB-HE	ZONAS CLIMÁTICAS IDAE	CONSUMO ENERGÉTICO MEDIO ANUAL (kWh/año)	CONSUMO ENERGÉTICO ANUAL DEL MODELO DE REFERENCIA (kWh/año)
Las Palmas de Gran Canaria	α	Mediterránea	13 250	6947,27
Almería	A	Mediterránea	13 250	10 575,09
Sevilla	B	Mediterránea	13 250	12 111,21
Bilbao	C	Atlántico Norte	15 000	15 069,56
Barcelona	C	Mediterránea	13 250	12 491,76
Santiago de Compostela	D	Atlántico Norte	15 000	17 633,48
Madrid	D	Continental	19 667	16 016,80
Burgos	E	Continental	19 667	20 958,50

Tabla 7.48. Consumo energético medio (kWh/año) de una vivienda unifamiliar en función de las zonas climáticas en España y consumo energético medio anual (kWh/año) del modelo de referencia en cada una de las ocho ciudades.

En ciudades como Almería, Sevilla, Barcelona o Madrid, con veranos más cálidos, radiación solar intensa (Tabla 7.46) y pocas precipitaciones anuales, el modelo B autosuficiente, debido a las características mencionadas, presenta un comportamiento energético destacablemente peor que los modelos A y C. En cambio, en ciudades como Bilbao, Santiago de Compostela o Burgos, con temperaturas más bajas (Tabla 7.45), menor radiación solar y mayores precipitaciones, este modelo ajardinado extensivo puede llegar a producir un mayor ahorro energético anual respecto al modelo de referencia que el modelo A. Si la comparación se realiza entre los modelos ajardinados extensivo (B) e intensivo (C), se aprecia, en todas las ciudades, excepto en Las Palmas de Gran Canaria, un consumo energético anual menor en el modelo C. El mayor espesor de la capa de sustrato, que aporta una mayor inercia térmica al sistema de cubierta, así como las particularidades de la vegetación (gramíneas) justifican estos valores. Tal y como ha indicado en el apartado 7.3.2.2.2, se produce mayor almacenamiento de agua en esta cubierta, a la vez que la vegetación es capaz conseguir mayores pérdidas de calor por evapotranspiración, especialmente en épocas cálidas, al no regular la apertura de sus estomas. Además, diferentes investigaciones han relacionado un mayor LAI (esta vegetación presenta un LAI=5) con mayores pérdidas de calor por evapotranspiración de la capa de vegetación<sup>62</sup>.

Debido a la mayor variación de comportamiento del modelo B, se profundiza en estudiar que variables climáticas presentan una mayor influencia en su comportamiento y en el ahorro energético obtenido. Teóricamente, el principal factor de enfriamiento de la superficie de una cubierta ajardinada son las pérdidas de calor por evapotranspiración, por lo que se valora la influencia de la zona climática o zona pluviométrica de promedios sobre este mecanismo de enfriamiento. Desde el punto de vista de las precipitaciones, en la figura 7.52 se percibe que conforme aumentan las precipitaciones anuales se producen menores pérdidas de calor por evapotranspiración en la cubierta ajardinada extensiva (modelo B). Por ejemplo, en el caso de ciudades como Bilbao, Santiago de Compostela o Burgos, donde se ha comprobado que se produce un mejor comportamiento energético del modelo B que del modelo A, las pérdidas de calor por evapotranspiración medias anuales se sitúan por debajo de los -0,80 W/m<sup>2</sup>. Esto se produce a pesar de tratarse de las ciudades situadas en zonas pluviométricas de promedios más elevadas (II, I y III, respectivamente). Por lo tanto, el hecho de disponer de mayor contenido de agua almacenada en el sustrato no es condición suficiente para

62 Berretta, C., Poë, S., Stovin, V. 2014; Santamouris, M. 2014.



que se produzca un aumento de las pérdidas de calor por evapotranspiración en la cubierta ajardinada extensiva autosuficiente.

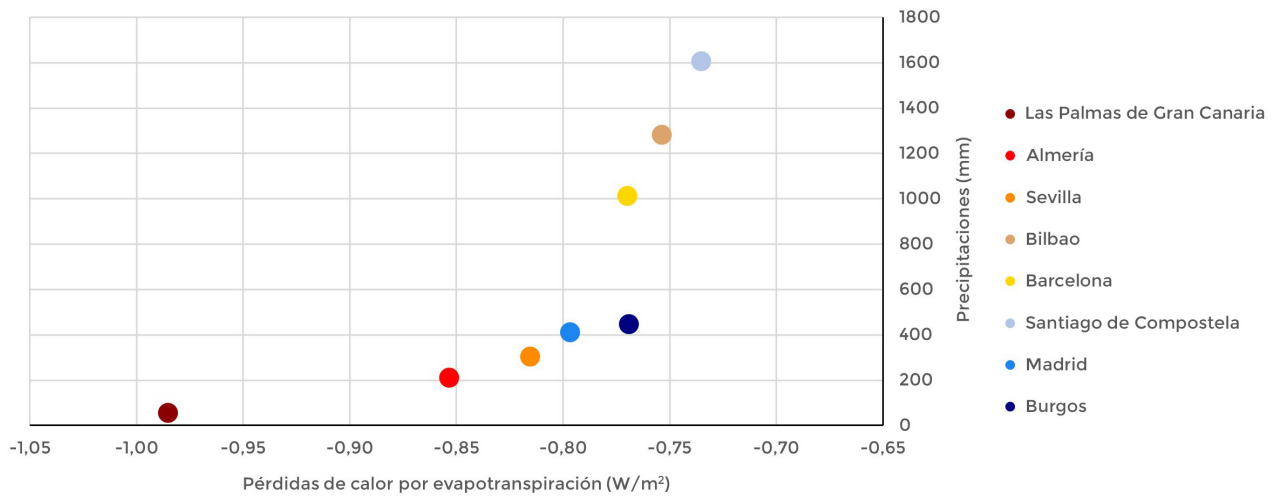


Figura 7.52. Pérdidas de calor por evapotranspiración totales medias anuales (W/m²) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en relación con las precipitaciones anuales (mm) de cada una de las ocho ciudades.

En cambio, si se relacionan las pérdidas de calor por evapotranspiración medias anuales con la temperatura media anual del aire se observa una relación entre las mayores temperaturas y el aumento de las pérdidas de calor por evapotranspiración (Figura 7.53). En este caso, Las Palmas de Gran Canaria, Almería, Sevilla, Barcelona o Madrid tienen temperaturas medias anuales del aire por encima de los 15 °C, produciéndose pérdidas por evapotranspiración mayores que en el caso de ciudades con menores temperaturas medias anuales del aire (hecho que coincide con mayores precipitaciones anuales). Se puede comprobar cómo, además, el descenso de la temperatura media anual produce un descenso en las pérdidas por evapotranspiración, especialmente en el salto entre Las Palmas de Gran Canaria, con una temperatura media anual de 20,95 °C, y el resto de las ciudades, con temperaturas medias anuales por debajo de los 20 °C.

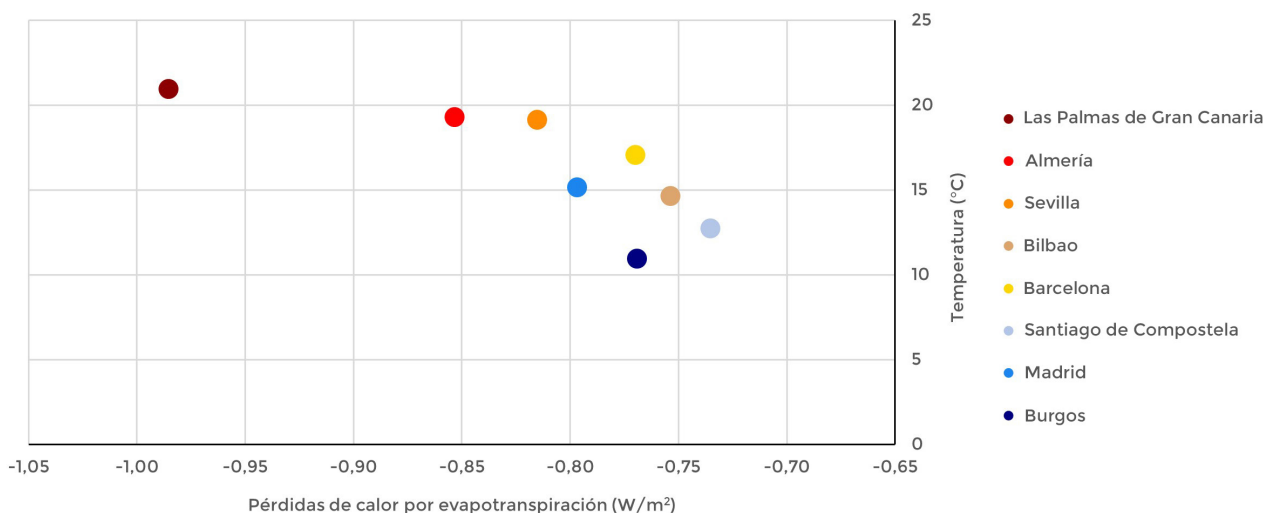


Figura 7.53. Pérdidas de calor por evapotranspiración totales medias anuales (W/m²) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en relación con la temperatura media anual (°C) de cada una de las ocho ciudades.

Por lo tanto, las ciudades con mayores temperaturas medias anuales y radiación solar son las que presentan mayores pérdidas de calor por evapotranspiración, en detrimento de aquellas ciudades en las que se producen mayores precipitaciones anuales pero menos temperatura media anual. Esto indica que las pérdidas de calor por evapotranspiración en cubiertas ajardinadas autosuficientes están más influenciadas por la temperatura ambiente y la radiación solar. Es decir, en ciudades con temperaturas medias anuales elevadas



se producen mayores pérdidas de calor por evapotranspiración, a pesar de disponer de menos agua en las capas de sustrato y vegetación. Se puede intuir a través de estos datos que, si en ciudades como Almería o Sevilla, con elevadas temperaturas y radiación solar, se produjeran mayores precipitaciones anuales, el agua disponible sería mayor y las pérdidas de calor por evapotranspiración serían más elevadas.

Al comparar las ciudades de Madrid y Santiago de Compostela, ambas situadas en la zona climática D, se puede apreciar que Madrid presenta una temperatura media anual  $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  mayor y una radiación solar máxima media anual  $76\text{ W/m}^2$  superior a los valores de Santiago de Compostela. En este caso, las pérdidas de calor por evapotranspiración medias anuales en Madrid son  $-0,06\text{ W/m}^2$  mayores que en Santiago de Compostela, a pesar de que en esta última ciudad las precipitaciones anuales han sido  $1195,7\text{ mm}$  superiores a los valores de Madrid. En el caso de Bilbao y Barcelona, ambas ciudades en la zona climática C, se observa que a pesar de presentar una variación de temperatura media anual igual que el caso de Madrid y Santiago de Compostela ( $2,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), la menor diferencia entre la radiación solar máxima ( $43\text{ W/m}^2$ ) produce que los valores de pérdidas medias anual por evapotranspiración de las dos ciudades sean muy similares ( $-0,75$  y  $-0,77\text{ W/m}^2$ , respectivamente, siendo mayor en la ciudad con mayor temperatura y radiación solar).

Conocidas las variables más influyentes en el proceso de pérdida de calor por evapotranspiración en cubiertas autosuficientes, en la figura 7.54 se ilustra que las mayores pérdidas medias anuales no implican un mayor ahorro energético anual en el caso de la cubierta ajardinada extensiva (modelo B) respecto al modelo de referencia. En este caso, el ahorro energético es mayor a menor temperatura ambiental, por lo que este factor es más determinante que no las pérdidas de calor por evapotranspiración medias anuales de la cubierta (Figura 7.55). Partiendo de un edificio sin aislamiento previo en la envolvente, el ahorro energético anual obtenido al mejorar la envolvente térmica e instalar una cubierta ajardinada extensiva es mayor cuanto más extremo y frío es el clima. Las ciudades que presentan menores temperaturas medias anuales, además de ser aquellas ubicaciones con variaciones térmicas diarias y anuales mayores (probablemente debido a que son ciudades interiores, sin contacto directo con el mar) son las que consiguen un mejor ahorro energético. En Bilbao, Santiago de Compostela, Burgos o Madrid el ahorro energético es mayor al  $34\%$ , mientras que, en ciudades como Almería, Sevilla o Barcelona, ubicadas en climas más cálidos, el ahorro obtenido es del  $9,1\%$ ,  $16,7\%$  y  $23\%$ , respectivamente.

Estos datos se justifican atendiendo a diversos conceptos. En primer lugar, al tratarse de cubiertas ajardinadas autosuficientes, el agua disponible para que se produzcan pérdidas por evapotranspiración en las capas de sustrato y vegetación se encuentra limitada. Por lo que, en zonas con mayores temperaturas y radiación solar se producen mayores pérdidas de calor por evapotranspiración, pero limitadas a la cantidad de agua disponible, ya que como se ha indicado estas ciudades coinciden con las de menores precipitaciones anuales (zonas pluviométricas de promedios más bajas). Este tipo de cubiertas, en climas cálidos y secos, no desarrollan su máximo potencial de enfriamiento por evapotranspiración.

Por otro lado, la geometría y orientación del edificio juegan un papel importante, al igual que en el caso descrito en el apartado 7.3.1. Las principales fachadas de la vivienda son sur y oeste, con mayor incidencia de la radiación solar (en el hemisferio norte) y mayor porcentaje de huecos (véase tabla 7.8). La investigación planteada solo implica una mejora térmica de la envolvente, sin considerar la introducción de otros mecanismos como elementos de control solar que eviten la incidencia directa del sol en estas fachadas, disminuyendo así las transmisiones de calor a través de las ventanas y cerramientos más expuesto a la radiación solar. Las fachadas sur y oeste, tanto en su parte opaca como en los huecos de ventanas, alcanzan elevadas temperaturas en el exterior a lo largo de todo el día. El aumento del aislante térmico y la inercia del cerramiento junto a los tratamientos de control solar de los vidrios de las ventanas reducen y retrasan la transmisión de calor desde el exterior del cerramiento al interior de la vivienda. Pero parte del calor llegará, desfasado en el tiempo, al interior y aumentará la temperatura de las estancias. Este calor no se puede disipar de manera natural durante periodos en que la temperatura ambiente baja (como, por ejemplo, durante la noche) ya que la ventilación diseñada es la mínima necesaria por normativa (véase Anexo III), las filtraciones de aire del exterior se han reducido gracias a la mejora del sistema constructivo y la elevada inercia de la envolvente dificulta los flujos de calor negativos de salida. En este caso, se produce un aumento en el consumo energético de refrigeración, ya que es el mecanismo empleado para la reducción de esta temperatura interior.



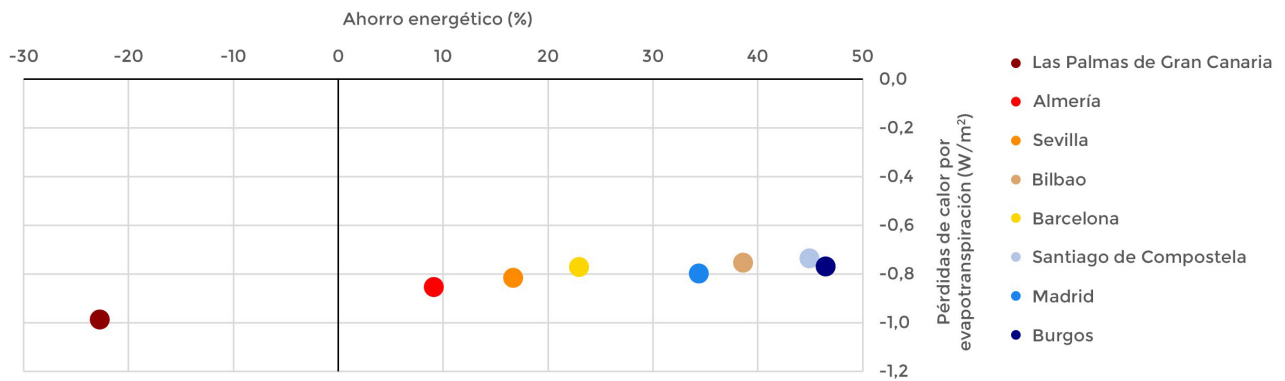


Figura 7.54. Ahorro de energía total final anual (%) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en relación con las pérdidas de calor por evapotranspiración totales medias (W/m²) de cada una de las ocho ciudades.

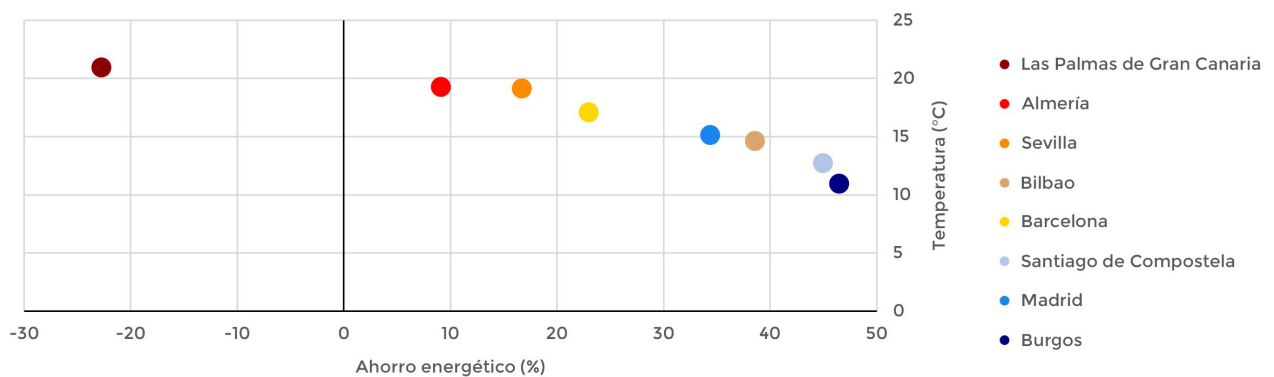


Figura 7.55. Ahorro de energía total final anual (%) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en con la temperatura media anual (°C) de cada una de las ocho ciudades.

En climas cálidos, con elevada radiación solar, estas ganancias son muy elevadas y el consumo de refrigeración aumenta considerablemente respecto al consumo producido en el modelo de referencia sin aislamiento, con menor inercia térmica de la envolvente y mayores filtraciones de aire. Además, en estas ciudades el consumo energético de refrigeración ya suponía un elevado porcentaje respecto al consumo total (por ejemplo, en Sevilla, en el modelo de referencia el consumo de refrigeración suponía un 22 % del total). Esta circunstancia derivada de la orientación del edificio supone un aumento del consumo de refrigeración, por lo que en ubicaciones como Sevilla la influencia del consumo de refrigeración respecto al consumo total todavía aumenta más (41,7 % en el modelo B). En cambio, en climas fríos, donde el consumo energético de refrigeración es mínimo (por ejemplo, en Burgos, es del 1,2 %) y tiene mucho mayor peso el consumo energético de calefacción (77,2 %), además de tratarse de climas con una radiación solar menor, estas ganancias son positivas, ya que calientan el interior de las estancias y reducen el principal consumo energético, es decir, el de calefacción (49 % en el modelo B en Burgos).

Por lo tanto, en cubiertas ajardinadas autosuficientes, sin riego, las mayores pérdidas de calor por evapotranspiración se ven más influenciadas por mayores temperaturas medias anuales del aire (coincidiendo con las conclusiones de los apartados 7.3.2.2.2 y 6.6.2.1, y de Berreta *et al.*<sup>63</sup>), mientras que las precipitaciones anuales no parecen ser determinantes si no van acompañadas de temperaturas y radiación solar elevada. Almería o Sevilla, ubicadas en climas cálidos, secos y con elevada radiación solar, presentan pérdidas por evapotranspiración medias anuales de  $-0,85 \text{ W/m}^2$  y  $-0,82 \text{ W/m}^2$ , mientras que, en Bilbao, Santiago de Compostela y Burgos (con mayores precipitaciones, pero temperaturas más bajas y menor radiación solar) las pérdidas de calor por evapotranspiración medias anuales se sitúan por debajo de los  $-0,80 \text{ W/m}^2$ .

Pero en el proceso de rehabilitación energética de un edificio es necesario considerar otros factores. Estas mayores pérdidas de calor por evapotranspiración, principal mecanismo de enfriamiento de la superficie

63 Berretta, C., Poë, S., Stovin, V. 2014.



exterior de las cubiertas ajardinadas, no se visibilizan en un mayor ahorro energético respecto al modelo de referencia debido a cuestiones como, por ejemplo, la elevada incidencia de la radiación solar en las dos principales fachadas de la vivienda. En este caso sería necesarios, como se ha mencionado en el apartado 7.3.2.2.1, emplear mecanismos que limiten la incidencia directa del sol en estas fachadas (especialmente en periodos en que resulte negativo, permitiendo la incidencia en épocas frías en las que las ganancias pueden suponer una reducción del consumo de calefacción), aumentar la ventilación del interior de la vivienda (sobre todo en momentos que disminuya la temperatura ambiente y la radiación solar incidente) o emplear sistemas constructivos que permitan disipar el calor acumulado en la superficie exterior antes de que alcance el interior de la vivienda (fachadas con cámara de aire ventilada). Considerar la rehabilitación energética de un edificio como un problema de una sola solución puede ser perjudicial, e incluso contraproducente, especialmente en el caso de climas cálidos, como se ha indicado. Es por ello que las cubiertas ajardinadas, con sus amplias ventajas deben estudiarse no solo en particular, sino también cómo funcionan en el conjunto del edificio y junto a otros mecanismos de mejora energética para poder alcanzar los máximos beneficios posibles con las limitaciones existentes.

#### **7.3.4. Propuestas de riego para la mejora del comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas<sup>64</sup>**

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, las cubiertas autosuficientes presentan un crecimiento y desarrollo de la vegetación y unas pérdidas de calor por evapotranspiración limitadas al agua disponible y derivada de los eventos lluviosos. Especialmente, en zonas cálidas y con pocas precipitaciones se podrían aumentar las pérdidas de calor por evapotranspiración con un mayor contenido de humedad disponible en las capas de substrato y almacenamiento de agua. En este caso, la combinación de elevadas temperaturas ambientales y radiación solar con la mayor disponibilidad de agua podría implicar un aumento de la competitividad energética de las cubiertas ajardinadas, es decir, un aumento de la temperatura superficial exterior de la cubierta y del ahorro energético conseguido<sup>65</sup>. Además, también supone la mejora de otros beneficios ambientales, como la reducción del efecto de isla de calor<sup>66</sup>.

De acuerdo con el apartado 7.3.1, y más concretamente para la ciudad de València en la tabla 7.37, la mejora de la inercia térmica de la cubierta supone un ahorro energético importante respecto al modelo de referencia, siendo mayor al 50 % del ahorro obtenido al rehabilitar toda la envolvente. Por lo tanto, se opta en el estudio sobre propuestas de riego por la rehabilitación únicamente de la cubierta, en base a los tres sistemas constructivos empleados hasta el momento: cubierta tradicional sin ajardinamiento con acabado de grava (modelo A), cubierta ajardinada extensiva (modelo B) y cubierta ajardinada intensiva (modelo C).

Se simularán el modelo de referencia y los tres modelos rehabilitados durante todo un año (2022). En el caso de los modelos ajardinados (B y C) se plantean tres calendarios (*Schedule*) de riego: sin riego (cubierta autosuficiente), con riego diario durante todo el año y con riego diario únicamente durante la época de refrigeración. Se considera época de refrigeración los meses con predominio del uso de este sistema de climatización en el modelo de referencia, es decir, en los meses de junio a septiembre. Respecto al riego, se instala un sistema de riego por goteo programado diariamente de 04:00 h a 05:00 h, evitando pérdidas de agua por evaporación, derivadas de la radiación solar incidente.

##### **7.3.4.1. Intensidades de riego**

En relación con la cantidad de agua suministrada por el riego, se plantea el estudio de tres intensidades de riego de acuerdo con la bibliografía consultada<sup>67</sup>: ( $i_1$ ) 0 mm; ( $i_2$ ) 3 mm; ( $i_3$ ) 6 mm. En primer lugar, es necesario valorar que intensidad de riego es más adecuada para cada tipo de cubierta ajardinada, ya que

<sup>64</sup> Los resultados de la investigación desarrollada en el apartado 7.3.4, en relación con la introducción de riego para mejorar el comportamiento energético de las cubiertas ajardinadas, se encuentra en revisión en la revista *Journal of Building Engineering*, bajo el título "*Irrigation proposals for improvinh the energy performance of green roofs in Mediterranean climate*".

<sup>65</sup> Gomes, M.G., Silva, C.M., Valadas, A.S., et al. 2019; Vestrella, A. 2016; Yazdani, H., Baneshi, M. 2021; Zinzi, M., Agnoli, S. 2012.

<sup>66</sup> Yang, J., Kumar, D.I.M., Pyrgou, A., et al. 2018.

<sup>67</sup> Vestrella, A. 2016.



es necesario encontrar el equilibrio entre consumo de agua y mejora del comportamiento energético. Es importante no olvidar, en ningún caso, los problemas de escasez de agua a los que se enfrenta, en especial, la costa mediterránea española (véase apartado 6.2.6). Para ello, se simulan las intensidades  $i_2$  e  $i_3$  en los modelos B y C, y se estudia el aumento de las pérdidas de calor por evapotranspiración en cada uno de los casos. Estos valores se comparan con las pérdidas producidas en la capa de vegetación y sustrato en el supuesto sin riego ( $i_1$ ). Se analiza la evolución diaria en un día representativo de la época de refrigeración (12 de julio).

En el caso del modelo B, ajardinado extensivo, la figura 7.56 ilustra como las mayores pérdidas de calor por evaporación en el sustrato se producen en la intensidad de riego  $i_2$ , mientras que las pérdidas por evapotranspiración en la capa de vegetación son prácticamente iguales en los dos supuestos con riego ( $i_2$  e  $i_3$ ). La mayor intensidad de riego  $i_3$  no implica mayores pérdidas por evaporación en el sustrato, probablemente debido a la poca capacidad de almacenamiento de esta capa, de 0,10 metros de espesor. En el caso de la vegetación, la capacidad de regular la apertura de los estomas en momentos de intensa radiación solar, elevadas temperaturas y poca disponibilidad de agua (debido a la limitada capacidad de almacenamiento del sustrato) de la vegetación suculenta tipo *sedum* explica que las pérdidas que se producen en ambas intensidades de riego sean muy parecidas. En este caso, un mayor aporte diario de agua de riego no implica mayores pérdidas de calor en la superficie de la cubierta, aunque sí un mayor consumo de agua y coste económico, por lo que, las intensidades de riego a instalar en el modelo B serán: ( $i_1$ ) 0 mm; ( $i_2$ ) 3 mm.

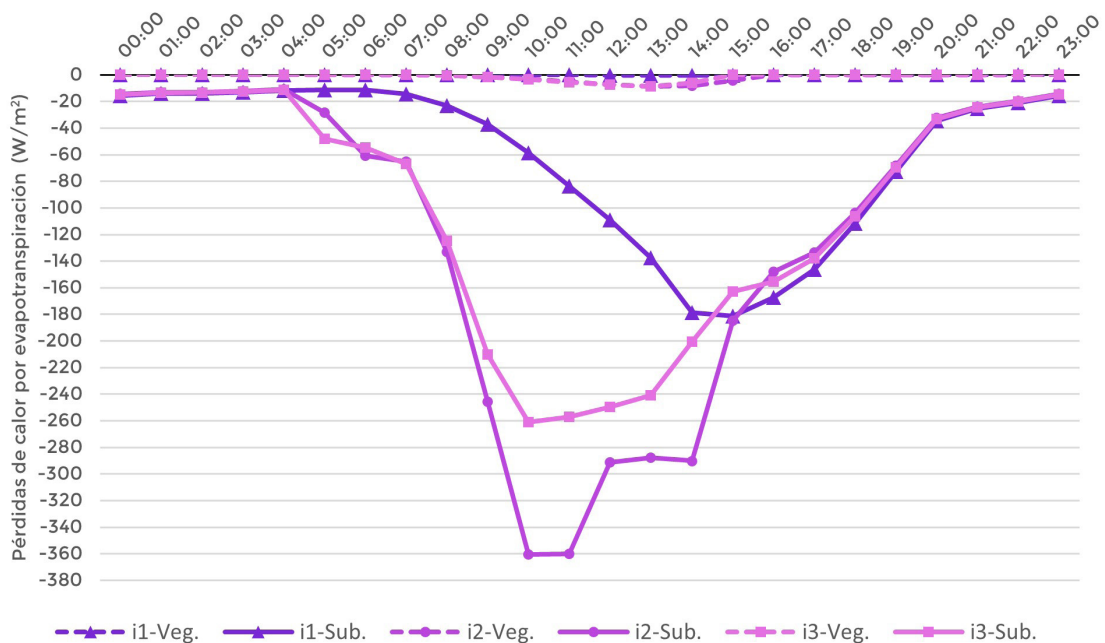


Figura 7.56. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en las capas de vegetación y sustrato en el modelo B, con tres intensidades de riego.

Respecto al modelo de cubierta ajardinada intensiva (C), el mayor espesor de la capa de sustrato (0,60 m) permite almacenar mayor cantidad de agua, por lo que una mayor disponibilidad produce un aumento de la evaporación producida a lo largo de todo el día en el sustrato del modelo con intensidad de riego  $i_3$ . Como el riego se programa durante la madrugada, se puede observar como el modelo con intensidad de riego  $i_2$  presenta valores de evaporación del sustrato similares al modelo con  $i_3$  durante las horas iniciales del día (Figura 7.57). Pero a las 12:00 h se produce una caída de las pérdidas de calor en el sustrato del modelo con  $i_2$ , pudiéndose justificar por la falta de agua, debido a las intensas pérdidas por evaporación en las primeras horas y la menor intensidad de riego. Tanto en el sustrato como en la vegetación se nota una diferencia considerable entre al modelo sin riego ( $i_1$ ) y los modelos con alguna intensidad de riego. Respecto a las pérdidas de calor por evapotranspiración en la capa de vegetación, también aumentan a mayor intensidad de riego. En este caso, la vegetación tipo gramínea no es capaz de regular la apertura de los estomas y minimizar la evapotranspiración y el consumo de agua en épocas de estrés hídrico, por lo que la diferente



intensidad de riego repercute visiblemente en las pérdidas de calor producidas, al contrario que en el modelo B. Las intensidades de riego a instalar en el modelo C serán: ( $i_1$ ) 0 mm; ( $i_3$ ) 6 mm.

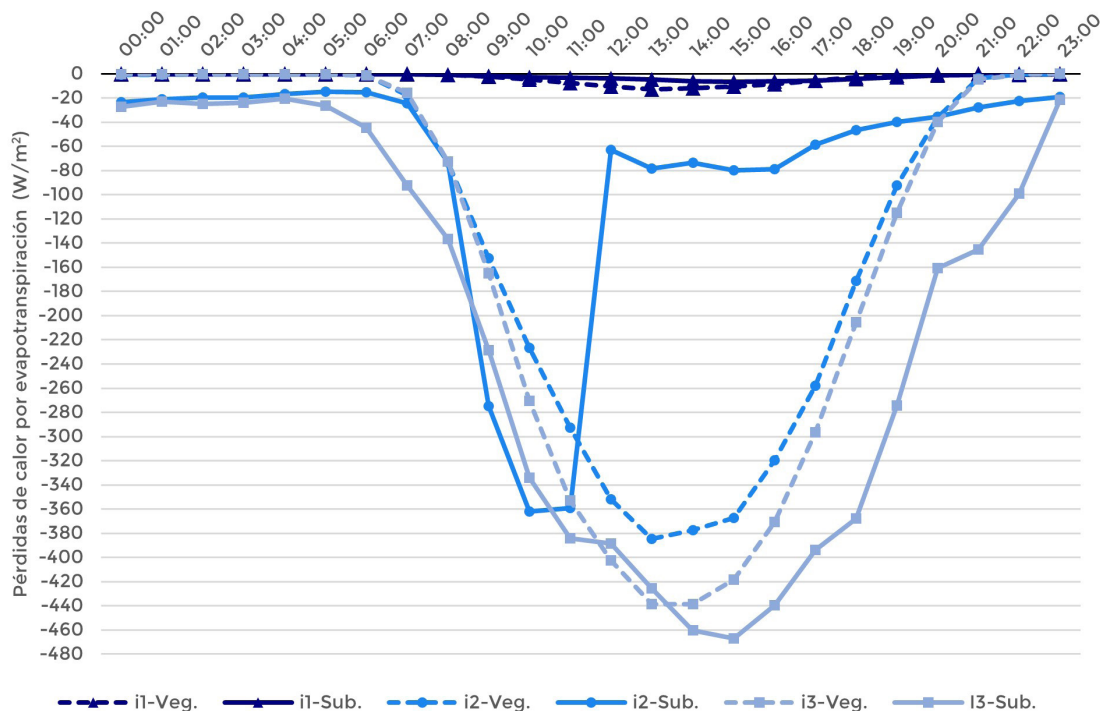


Figura 7.57. Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en las capas de vegetación y substrato en el modelo C, con tres intensidades de riego.

### 7.3.4.2. Comportamiento energético

De acuerdo con las consideraciones del apartado 7.3.4.1, se simulan los modelos A, B y C considerando: (A-B-C) solo precipitaciones y sin riego,  $i_1$ ; (Br1-Cr1) riego diario todo el año con  $i_2$  para el modelo ajardinado extensivo e  $i_3$  para el modelo ajardinado intensivo; (Br2-Cr2) riego diario durante el período de predominio de refrigeración (junio a septiembre) con  $i_2$  para el modelo B e  $i_3$  para el modelo C, mientras que en los meses de enero a mayo y octubre a diciembre el sistema de riego no está en funcionamiento ( $i_1$ ). Los consumos energéticos anuales obtenidos en cada caso se recogen en la figura 7.58.

En primer lugar, se aprecia una disminución en el consumo anual, tanto de refrigeración, calefacción como total, al rehabilitar y mejorar el sistema constructivo de cubierta. La instalación de un sistema de cubierta ajardinada, tanto extensiva (B) como intensiva (C), produce un mayor ahorro respecto al edificio de referencia, sin aislamiento en la envolvente, en comparación con el ahorro obtenido respecto al modelo A, con una cubierta tradicional sin ajardinar, pero con un aislamiento suficiente para cumplir con la transmitancia límite de la normativa en vigor. El mayor ahorro en el consumo de energía total anual conseguido respecto al modelo A se produce en los casos que se instala riego solo en época de refrigeración (Br2 y Cr2) con un ahorro del 0,84 % y el 1,88 %, respectivamente. Estos datos concuerdan con los valores aportado por Berardi<sup>68</sup>, concluyendo que el mayor ahorro se relacionaba con un mayor espesor de substrato y LAI de la vegetación.

En los modelos ajardinados sin riego ( $i_1$ ), la disponibilidad de agua se encuentra condicionada a las precipitaciones, no muy abundantes en la costa mediterránea española y agrupadas principalmente en los meses de primavera y otoño. Por lo tanto, durante la época de refrigeración, con elevada temperatura ambiental y radiación solar intensa, las lluvias son más dispersas y de menor intensidad. Esto produce una menor disponibilidad de agua para el substrato y la vegetación, limitando las pérdidas de calor por evapotranspiración. Por lo tanto, el consumo anual de refrigeración de los modelos B y C es menor que el consumo de refrige-

68 Berardi, U. 2016.



ración del modelo de referencia, pero mayor que el consumo del modelo A (Tabla 7.49). El ahorro obtenido en refrigeración en los modelos ajardinados respecto al modelo de referencia se sitúa entre un 21 % y 37 %, datos que concuerdan con las investigaciones de Santamouris *et al.*<sup>69</sup>

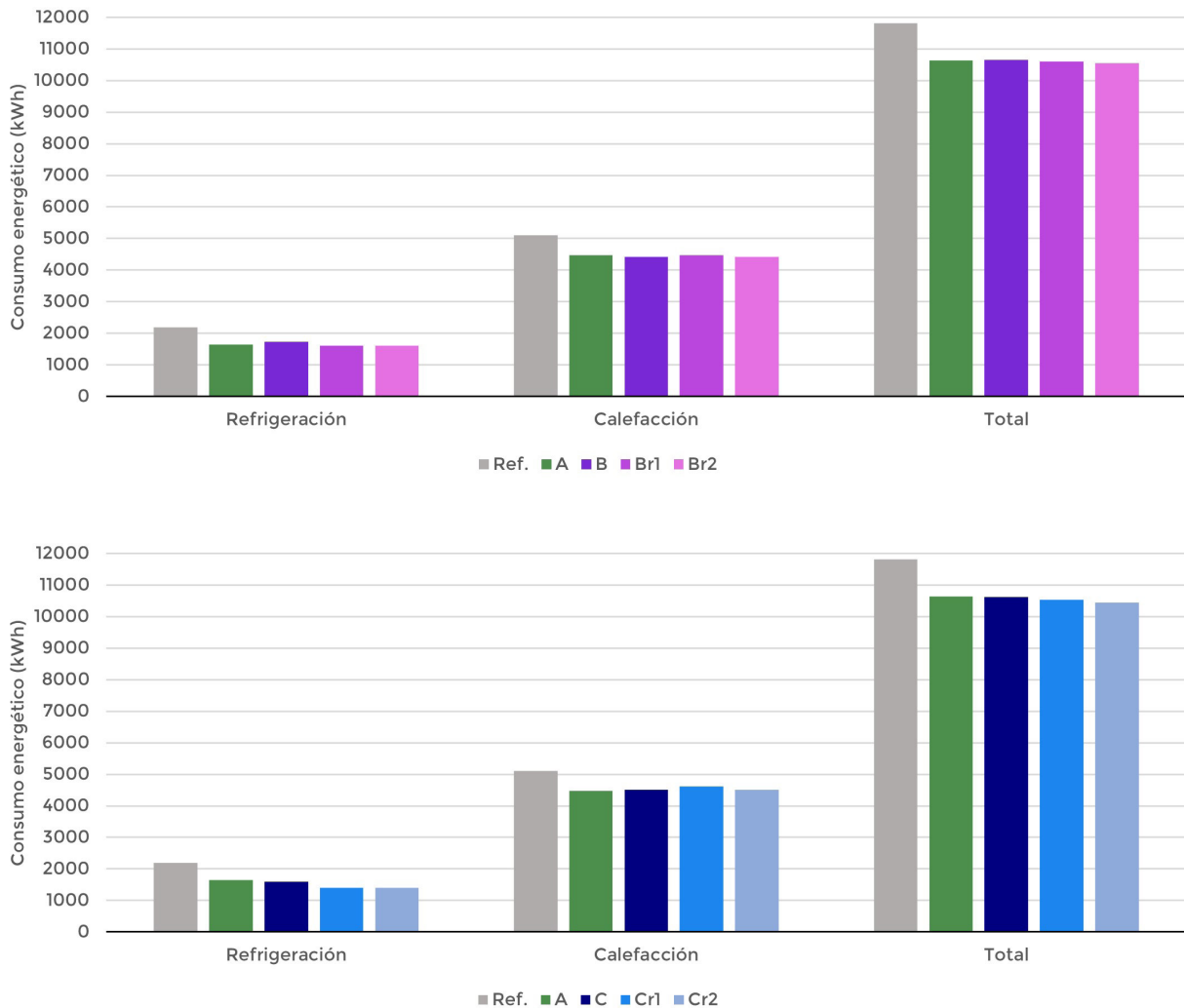


Figura 7.58. Consumo energético (kWh) total y de los sistemas de climatización del modelo de referencia (Ref.) y de los modelos rehabilitados con los diferentes sistemas constructivos e intensidades de riego. Modelo B (sup.) y modelo C (inf.).

AHORRO ENERGÉTICO (%)			
Modelo	Refrigeración	Calefacción	Total
A	24,75	12,36	9,92
B	21,19	13,50	9,76
C	27,03	11,65	10,04
Br1	26,52	12,41	10,28
Cr1	36,04	9,69	10,87
Br2	26,27	13,45	10,68
Cr2	35,66	11,59	11,62

Tabla 7.49. Ahorro energético (%) en comparación con el modelo de referencia.

Por ello, se plantea la instalación de un sistema de riego diario (Br1 y Cr1), con la intención de aumentar la disponibilidad de agua y la disipación de calor en la superficie de la cubierta ajardinada, especialmente en épocas con elevada temperatura ambiental. En la ciudad de València, el consumo anual de refrigeración

69 Santamouris, M., Pavlou, C., Doukas, P., et al. 2007.



supone, en el modelo de referencia, un porcentaje del 18,54 % sobre el consumo total (véase tabla 7.19). Este valor es relevante y puede disminuirse al aumentar las pérdidas de calor por evapotranspiración. En el caso de las cubiertas Br1 y Cr1 el consumo anual de refrigeración es menor, suponiendo un ahorro respecto al modelo de referencia un 5,33 % y 9,01 % mayor que en los modelos ajardinados sin riego (B y C). En cambio, se aprecia un aumento en el consumo anual de calefacción.

Especialmente, la elevada radiación solar en València (véase tabla 7.12), que puede generar una carga térmica sobre la cubierta 2 veces mayor que sobre una fachada orientada a sur (en el hemisferio norte)<sup>70</sup>, produce, a lo largo de todo el año, una temperatura superficial elevada incluso en los meses de predominio de calefacción con una temperatura ambiental más baja o moderada. En este caso, un aumento de la temperatura superficial en las cubiertas rehabilitadas implica, también, mantener la temperatura superficial interior más elevada, y disminuir así el consumo energético de calefacción para mantener la temperatura de consigna en el interior durante las horas que el sistema de climatización está encendido. Al mismo tiempo, la reducción de la transmitancia térmica de la cubierta asegura una disminución de los flujos negativos de calor, causantes de las pérdidas del calor interior, por lo que se reduce el consumo energético de calefacción en todos los casos respecto al modelo de referencia.

Pero una mayor disponibilidad de agua en las cubiertas ajardinadas también implica mayores pérdidas de calor por evapotranspiración en esta época de predominio de calefacción. Esto se debe a que la radiación solar incidente sobre la cubierta favorece el aumento de la temperatura superficial y la disipación de este calor mediante mecanismos de evaporación del sustrato y evapotranspiración de la vegetación. Como se indica en la figura 7.59, la mayor temperatura superficial en un día representativo de la época de calefacción (12 de febrero) se produce en el modelo A, alcanzando los 34,95 °C. La temperatura ambiente ese día oscila entre una mínima de 0,42 °C y una máxima de 16 °C. Los modelos de cubierta ajardinada extensiva sin riego durante todo el año (B) o sin riego durante la época de calefacción (Br2) presentan una temperatura superficial muy similar al modelo A, por encima de los 34 °C. Esto explica que los modelos A, B y Br2 sean los que presenten un mayor ahorro en calefacción respecto al modelo de referencia. En cambio, la instalación de un sistema de riego diario durante esta época implica una menor temperatura superficial, siendo la temperatura superficial del modelo Br1 6,86 °C inferior a la de los modelos B y Br2. Lo mismo ocurre en el modelo C. La mayor profundidad del sustrato y LAI de la vegetación implican menores temperaturas superficiales, incluso en los modelos sin riego en época de calefacción (C y Cr1), alcanzando máximas de 27,67 °C. En el caso de instalar riego durante esta época (Cr2), la caída en la temperatura superficial es de 12,98 °C respecto a los modelos C y Cr1. La temperatura superficial alcanzada por el modelo Cr2 es de 14,69 °C, valor incluso por debajo de la máxima temperatura ambiental en ese día.

Resulta importante evitar que, en épocas de predominio del consumo de calefacción, la superficie de la cubierta se encuentre demasiado fría, con valores que pueden llegar a situarse por debajo de la temperatura ambiente. A pesar de ello, se debe destacar que durante la noche y primeras horas de la mañana el sustrato y la capa de vegetación favorecen un aumento de las temperaturas superficiales, en comparación con la superficie del modelo A sin ajardinar, con valores similares a los de la temperatura ambiente.

En ubicaciones con elevada radiación solar incluso en los meses fríos con menores temperaturas, la instalación de un sistema de riego diario anual no implica beneficios sustanciales, ya que las reducciones en el consumo de refrigeración se compensan con un aumento del consumo de calefacción, produciendo un ahorro total anual muy similar a los modelos sin riego, con diferencias menores a un 1 %. En este caso, la instalación del sistema de riego solo en el periodo de refrigeración, además de contribuir al menor consumo de agua, reduce el consumo energético de refrigeración a la vez que reduce o no aumenta el de calefacción. La menor disponibilidad de agua en los meses de predominio del consumo de calefacción reduce las pérdidas de calor en la superficie de la cubierta, así como también reduce la conductividad térmica del sustrato, al encontrarse seco y con menor agua almacenada. En este caso, el ahorro anual que se obtiene es el mayor de todos los modelos estudiados. Estos supuestos, Br2 y Cr2, suponen un ahorro energético total anual del 1,02 % y 1,75 %, respectivamente, respecto a los modelos sin riego (B y C).

---

70 Britto, C. 2001.

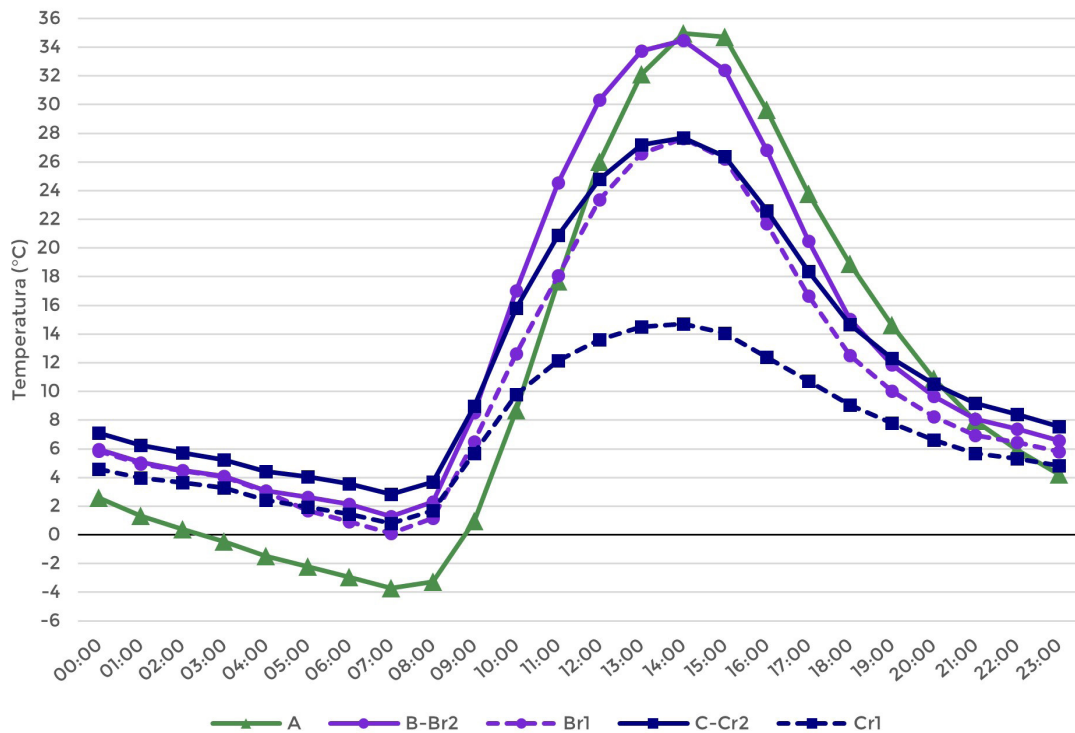


Figura 7.59. Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta en cada modelo de rehabilitación.

Al comparar entre sí los modelos Br2 y Cr2, se observa que el ahorro anual total obtenido respecto al modelo de referencia se diferencia en un 1 %, aproximadamente. En base al peso propio del sistema y el coste de construcción (variables de gran importancia en el campo de la rehabilitación) el modelo ajardinando extensivo autosuficiente se muestra como el mejor sistema de rehabilitación, al obtener un ahorro energético total anual muy similar al modelo intensivo, de mayor coste y peso propio (véase aparta 7.3.1). En el caso sin riego, la diferencia entre el ahorro total obtenido entre los modelos B y C respecto al modelo de referencia es incluso más escueta (0,28 %), debido a la limitada capacidad de enfriamiento por evapotranspiración. Al introducir la problemática de la escasez de agua y la búsqueda del equilibrio entre consumo de agua y consumo energético, el modelo Br2 presenta un comportamiento energético muy similar al del modelo Cr2, pero con un consumo de agua un 50 % menor.

A partir de los datos expuestos anteriormente, se puede concluir que la mayor disponibilidad de agua, gracias al sistema de riego, no implica necesariamente un mayor ahorro energético total. Ya que una programación errónea del riego (calendarios) puede implicar una disminución del consumo anual de refrigeración, pero un aumento en el consumo anual de calefacción. El diseño de un sistema de riego diario únicamente durante los meses de predominio del consumo de refrigeración (junio a septiembre), manteniendo una intensidad de riego de 0 mm ( $i_1$ ) el resto del año, asegura mayores pérdidas de calor por evapotranspiración en los meses de predominio de refrigeración, al igual que en los casos Br1 y Cr1.

Pero al contrario que estos, el limitado contenido de agua en los meses de predominio de calefacción implica que el consumo anual de calefacción respecto al modelo de referencia no aumente, o incluso disminuya, en comparación con los modelos sin riego. Así, con estos modelos Br2 y Cr2 se consigue el mayor ahorro anual total respecto al modelo de referencia de entre todos los modelos simulados.

Cabe destacar que durante los meses de primavera y otoño, especialmente de marzo a mayo y de octubre a noviembre, las lluvias suelen ser más abundantes, por lo que la vegetación tiene suficiente disponibilidad de agua para su supervivencia y los fenómenos de evapotranspiración. De noviembre a febrero, las lluvias suelen ser más escasa y distanciadas en el tiempo, comportamiento similar al de los meses de verano (junio a septiembre). Desde la perspectiva de la supervivencia de la vegetación, como se ha introducido en apartados anteriores, sería necesario hacer un estudio de las necesidades hídricas de la vegetación instalada para suministrar en estos meses un aporte mínimo de agua destinada a su supervivencia.



La escasez de agua y el aumento del consumo energético de calefacción debe fomentar el empleo de vegetación con un bajo consumo de agua, adaptada al clima y capaz de soportar largos periodos sin agua (sequía). En este sentido, el modelo ajardinado extensivo todavía destaca más como el modelo constructivo más adecuado para rehabilitación, al presentar menor coste de construcción, peso propio, consumo de agua, necesidades hídricas de la vegetación, al tiempo que el ahorro energético total anual es muy similar al modelo ajardinando intensivo (diferencias alrededor del 1 %). En un periodo como el actual, de inestable encarecimiento del consumo energético, así como de urgente acción contra el cambio climático, las soluciones sostenibles que consigan obtener un cierto ahorro energético deben ser consideradas y aplicadas.



**CUBIERTAS AJARDINADAS**

**ESTUDIO CONSTRUCTIVO**





## 8. DETALLES CONSTRUCTIVOS

La rehabilitación de una vivienda mediante la introducción de una cubierta ajardinada requiere de un estudio completo, que incluye aspectos energéticos, estructurales o económicos, entre otros (véase capítulos 6 y 7). Conocido el comportamiento de este tipo de cubiertas, sus ventajas e inconvenientes, y una vez seleccionado el sistema constructivo más adecuado para las necesidades que se presentan, resulta también de gran importancia comprender este sistema constructivo, su ejecución y la resolución de puntos singulares. El limitado desarrollo de detalles constructivos de cubiertas ajardinadas, especialmente adaptados al ámbito de la rehabilitación, han hecho necesario llevar a cabo un proceso de consulta y selección de la información disponible en la normativa existente (UNE-EN 13956, UNE 104416 y NTJ-11C, entre otras), los catálogos de empresas especializadas en suministro e instalación de este tipo de cubiertas (ZinCo Cubiertas Ecológicas) y documentos centrados en la investigación sobre la construcción de los sistemas de cubiertas, en general, y de sistemas ajardinados, en particular (los cuales se especifican a lo largo del capítulo 4). A partir de todos ellos se ha diseñado la que se considera la ejecución más óptima de las cubiertas ajardinadas extensivas en un caso de rehabilitación, tratando de dar respuestas a las particularidades y necesidades de este contexto. La consulta transversal de todos estos documentos ha permitido detectar diseños poco funcionales. Los criterios de elección y diseño de las soluciones constructivas más adecuadas se han centrado en obtener el máximo partido de todas las capas empleadas, así como mejorar la relación entre todas ellas, dándole una especial importancia al extenso estudio realizado sobre las capas separadoras en la presente tesis (véase apartado 4.1.10). Los detalles constructivos expuestos en los próximos apartados, así como las recomendaciones extraídas de ellos, son producto de este estudio y reflexión.

En rehabilitación, como el caso que se presenta a continuación, se debe llevar a cabo una primera fase de retirada de las capas existentes. Si la capa de material aislante se encuentra en buen estado puede aprovecharse, instalando si es necesario mayor espesor para cumplir con las limitaciones de transmitancia térmica indicadas en la normativa en vigor. Respecto a la lámina impermeable, no es recomendable confiar en el buen estado y correcto funcionamiento de la lámina existente. Habitualmente las láminas instaladas en el campo de la construcción de edificios han sido de tipo LBM (bituminosas). Por lo tanto, se puede sustituir la antigua lámina existente o, de acuerdo con la norma UNE 13956<sup>1</sup>, se puede instalar sobre la lámina antigua una lámina impermeable EPDM (caucho) para asegurar la correcta impermeabilización del sistema de cubierta ajardinado.

En este apartado se va a desarrollar, desde un punto de vista construcción, la posible rehabilitación mediante la conversión a cubierta ajardinada de las cubiertas de dos edificios basados en la residencia de ancianos Arangoiti (Beasain, Guipúzcoa), y la ampliación de Estudio Beldarrain (Figura 8.1). Se toma como base estos edificios debido a la versatilidad del proyecto y las amplias posibilidades que ofrece gracias a los diferentes sistemas constructivos. El edificio de la ampliación, a la derecha en la figura 8.2, presenta dos cubiertas planas, con una pendiente menor al 5 %, siendo la cubierta C1 no transitable (solo accesible para el mantenimiento) y la C2 transitable con zona pavimentada y zona ajardinada. En ambos casos se opta por un sistema ajardinado extensivo, de acuerdo con el modelo B presentado en los capítulos 6 y 7. Tal como se ha comprobado en ambos apartados, este modelo presenta el mejor equilibrio entre peso propio, coste de construcción y ahorro energético, así como beneficios ambientales que no se consiguen con una cubierta tradicional con acabado de grava. En este edificio, de construcción más reciente (2011), el sistema constructivo de fachada es corrido con pieza entera por delante de la estructura y de ladrillo cara vista, mientras que el forjado es bidireccional con losa de 23 cm de canto.

1 AENOR. 2013c.



Figura 8.1. Residencia de ancianos Arangoiti (izq.) y ampliación (dcha.).

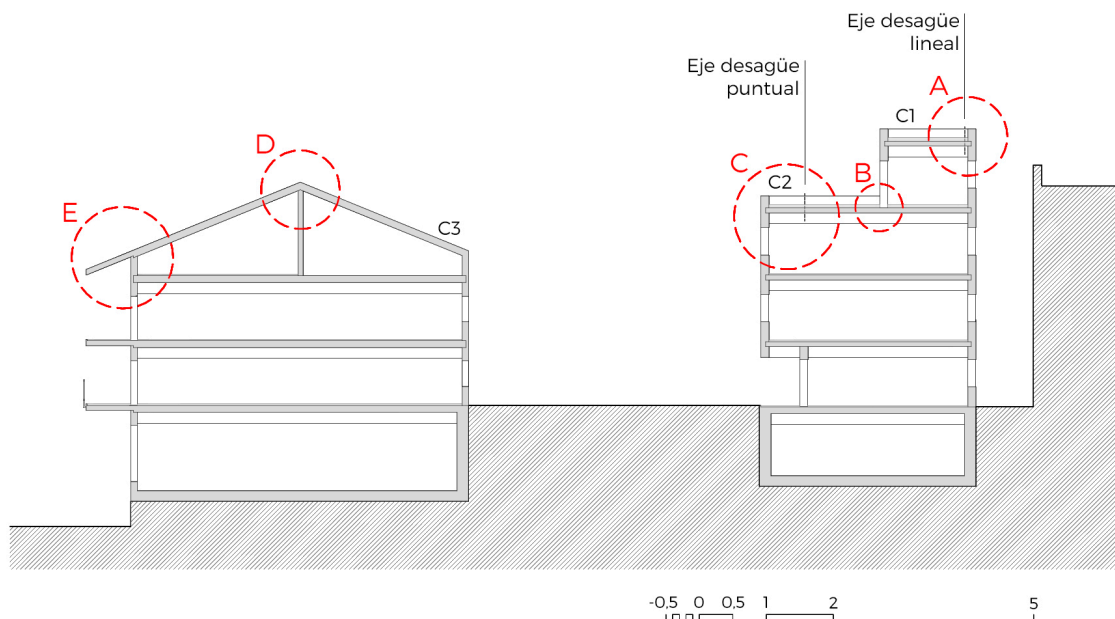


Figura 8.2. Sección de la residencia de ancianos Arangoiti (izq.) y ampliación (dcha.), marcando los tipos de cubierta (C1, C2 y C3) y los detalles constructivos realizados (A, B, C, D y E).

Por otro lado, el edificio original de la residencia, a la izquierda, presenta una cubierta inclinada (C3), con pendiente aproximada del 30 % (15°). En este caso se instala una cubierta ajardinada extensiva, teniendo en cuenta todas las precauciones necesarias para evitar problemas de deslizamiento en las diferentes capas del sistema de cubierta. En este edificio el sistema constructivo de fachada es de ladrillo inserto de la estructura y con revestimiento exterior continuo, mientras que el forjado es unidireccional, con viguetas y bovedillas, de 30 cm de canto.



## 8.1 DETALLES CONSTRUCTIVOS DE CUBIERTA PLANA

### 8.1.1 Detalle A. Cubierta no transitable: encuentro con paramento y desagüe lineal

Al tratarse de una cubierta no transitable, solo accesible para mantenimiento, no es necesario que el paramento perimetral conforme un antepecho de más de 1 metro de altura, así como tampoco es necesario colocar una rejilla en el desagüe lineal junto al paramento (canalón) (Figura 8.5). Aun así, se consideran que se producirán accesos repetidos para el mantenimiento de la cubierta y los elementos de recogida de agua, por lo que se dispone un punto de anclaje para los Equipos de Protección Individual (EPI) de los operarios que accedan a esta cubierta (Figura 8.3). Se ha optado por instalar el modelo de punto de amarre Fallnet® SR de la empresa ZinCo<sup>2</sup>. El punto de anclaje metálico se encuentra unido a una placa distribuidora de tracción, conformada por elementos cuadrículados especiales de material sintético. El punto de anclaje se dispone en una posición central respecto a la placa, que deberá ser de aproximadamente 5,3 m<sup>2</sup> para distribuir las tracciones a las que se encuentre sometido este punto de anclaje durante su utilización (Figura 8.4). El propio peso del substrato y la vegetación, o la grava, siempre que cumplan con la carga de recubrimiento necesaria y se instale una placa de superficie igual o mayor a 5,3 m<sup>2</sup>, lastran esta placa y aseguran el correcto funcionamiento y la seguridad del punto de anclaje.



Figura 8.3. Punto de anclaje para EPIs de operarios de mantenimiento de la cubierta ajardinada.

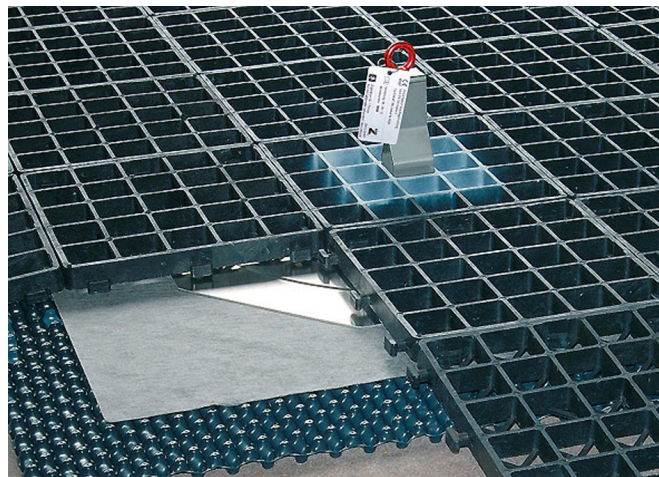
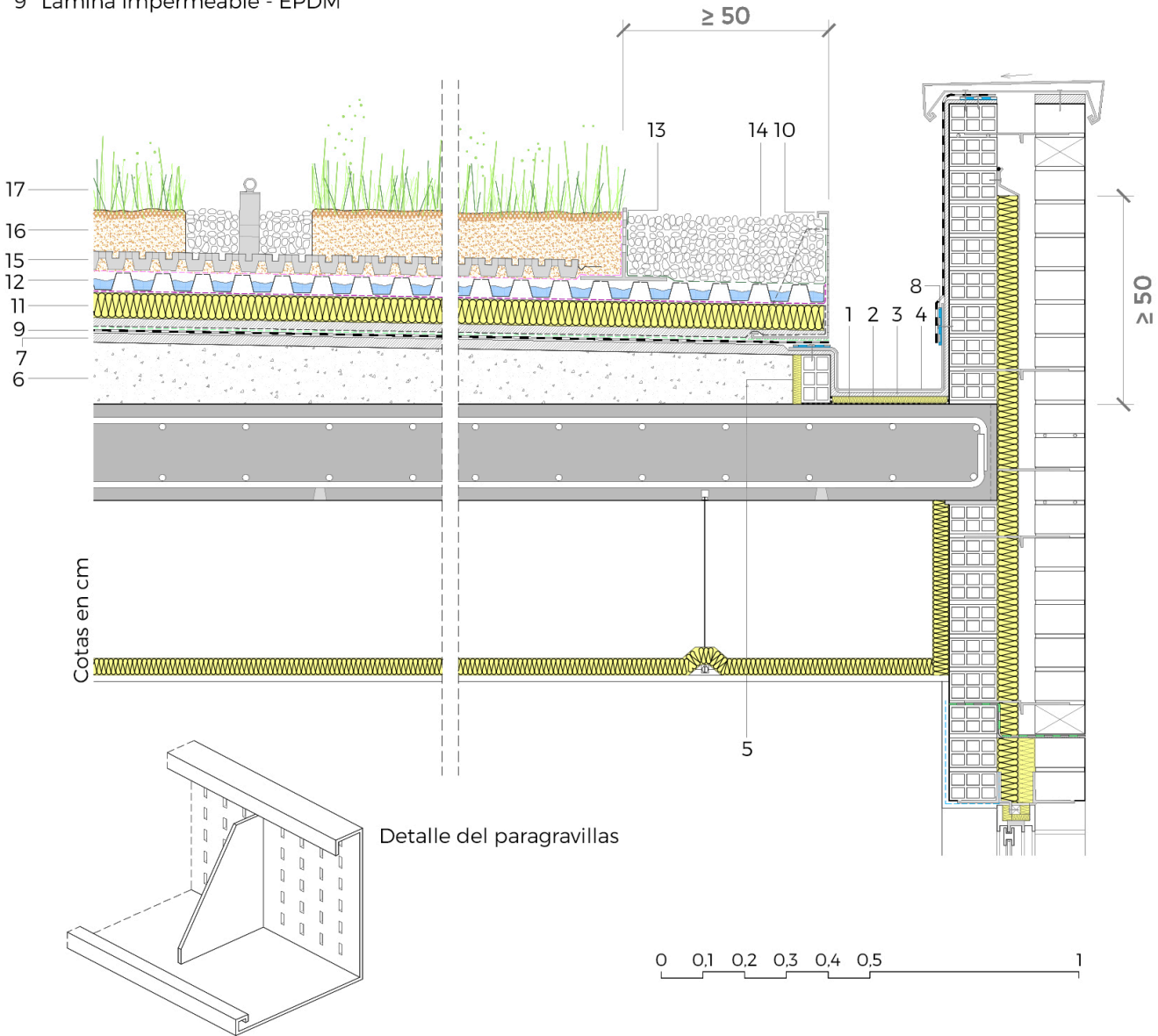


Figura 8.4. Punto de anclaje central en placa de distribución de tracciones.



- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1 Barrera de vapor                    | 10 Perfil metálico de separación perforado - Paragravillas |
| 2 Aislante térmico de alta densidad   | 11 Aislante térmico  |
| 3 Cama del canalón (espesor variable) | 12 Capa drenante   |
| 4 Pieza de canalón prefabricada       | 13 Perfil metálico de separación perforado                 |
| 5 Junta perimetral                    | 14 Gravas  |
| 6 Hormigón ligero de pendientes       | 15 Punto de anclaje con placa distribuidora                |
| 7 Mortero de regulación               | 16 Substrato   |
| 8 Perfil colaminado                   | 17 Vegetación  |
| 9 Lámina impermeable - EPDM           |  |



Cotas en cm

Detalle del paragravillas

- - - Lámina antiraíces
- - - Capa de separación química + antiadherente
- - - Capa separadora antipunzonante + filtrante
- - - Lámina filtrante
- - - Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente
- - - Malla de fibra de vidrio

Figura 8.5. Detalle A.



### 8.1.2 Detalle B. Cubierta transitable: acceso a cubierta en zona pavimentada

El acceso a la cubierta C2 desde el interior de la vivienda se realiza sin barreras arquitectónicas, por lo que será necesario considerar diferentes aspectos tanto en el interior como en el exterior. De acuerdo con la norma UNE 104416<sup>3</sup>, en el caso de realizar un acceso al exterior en el que no se pueda prolongar la lámina impermeable como mínimo 20 cm en vertical por el paramento, será necesario asegurar la no entrada de agua en el interior de la vivienda. Con este fin, se instala una canaleta integrada en el faldón, como elemento de recogida de agua de emergencia, frente a la puerta de acceso. Para asegurar la correcta recogida del agua y que no se produzca la entrada de esta en la vivienda, la canaleta deberá tener una profundidad mínima de 15 cm, una anchura mínima de 30 cm y prolongarse 30 cm o más a cada lado de la puerta. Respecto al diseño, esta canaleta tendrá una pendiente del 1 % perpendicular al papel, en la figura 8.7, y aberturas en el lateral para poder aprovechar el agua de la canaleta, recogiénola en la capa drenante con pendiente hacia la zona ajardinada. La propia canaleta dispondrá de una rejilla con resistencia suficiente para asegurar el paso de personas. Con la intención de generar un paso a nivel se colocará un pavimento de tarima de madera flotante sobre plots regulables en altura en el exterior (Figura 8.6) y un suelo técnico en el interior. Para asegurar la estabilidad y planeidad de los plots regulables en altura, así como aumentar la resistencia a compresión de la capa drenante continua bajo la zona pavimentada, se rellena el panel nodular con materiales granulares.

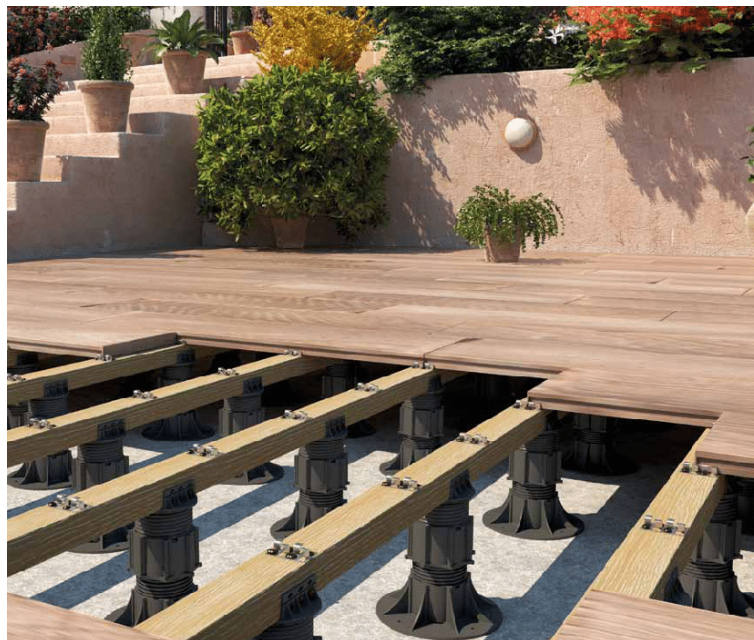


Figura 8.6. Tarima de madera flotante exterior sobre plots regulables en altura.

3 AENOR. 2009.



- |  |   |
|--|---|
| 1 Lana mineral con prestaciones a ruido aéreo e impacto con acabado de imprimación de oxiasfalto | 4 Carpintería con Rotura de Puente Térmico (RPT)                      |
| 2 Mortero con mallazo  | 5 Canaleta de emergencia integrada en el faldón                       |
| 3 Suelo técnico interior   | 6 Capa drenante con relleno de materiales granulares                  |
|  | 7 Tarima de madera flotante exterior sobre plots regulables en altura |

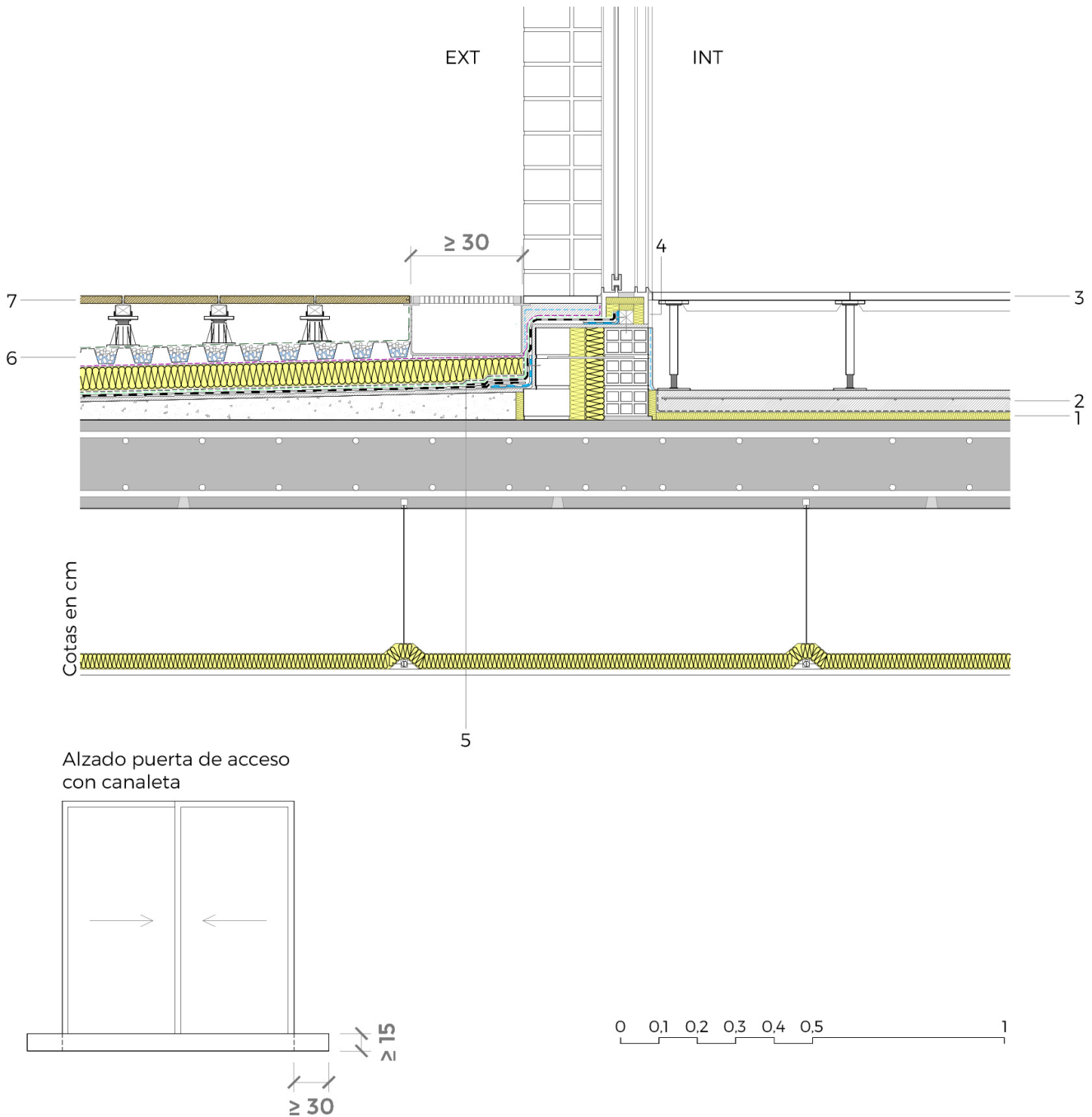


Figura 8.7. Detalle B.





### 8.1.3 Detalle C. Cubierta transitable: encuentro con paramento, desagüe puntual y transición entre zona ajardinada y pavimentada

En el caso de la cubierta C2 se debe tener en cuenta que es accesible y transitable, por lo que en el encuentro con el paramento se instala una barandilla con altura igual o mayor a 1 m (dependiendo de las exigencias de la normativa y las ordenanzas municipales). En este caso, para evitar la perforación de la lámina impermeable y antiraíces, con los problemas que puede suponer esa actuación, se opta por la instalación de una barandilla lastrada. Se escoge el modelo Fallnet<sup>®</sup> ASG de la empresa ZinCo<sup>4</sup>. Esta barandilla, detallada en la figura 8.10, se coloca sobre la capa drenante y lamina filtrante y se lastra con el substrato o grava que se instala sobre ella. Su montaje puede hacerse conformando un ángulo de 90° o de 67,5°, limitando su impacto visual en la fachada del edificio (Figura 8.8 y 8.9). Respecto a la zona de sumidero, con la instalación de 50 cm de grava alrededor del paragravillas, y a la transición entre la zona ajardinada y la pavimentada, en ambos casos se emplea un perfil metálico de separación perforado. En este caso, se ha optado por instalar una capa drenante continua en toda la cubierta C2, incluso debajo de la zona pavimentada. Gracias a las juntas abiertas del pavimento de madera se puede recoger en la capa drenante y aprovechar el agua en la zona ajardinada. Además, debido a las pendientes, es necesario que esta capa será continua para poder recorrer el agua correctamente en el desagüe puntual.



Figura 8.8. Montaje de la barandilla lastrada.



Figura 8.9. Montaje de la barandilla lastrada con ángulo de 67,5°.

4 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021i.

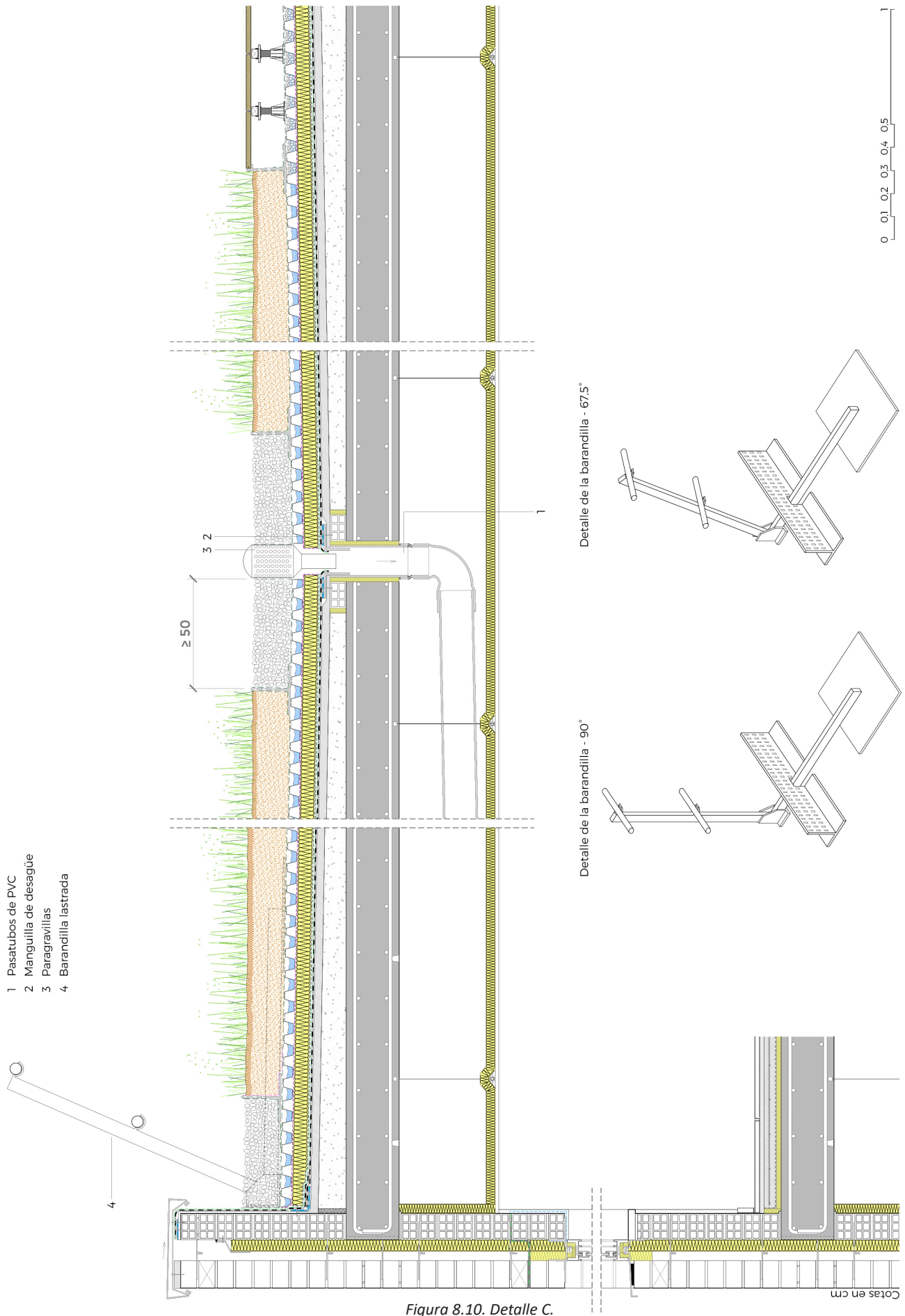


Figura 8.10. Detalle C.

En el caso de querer instalar un sistema de riego en la cubierta ajardinada (Figura 8.11), se opta por un sistema por capilaridad, ya que optimiza el consumo de agua al suministrarla directamente en la raíz de la vegetación. Se instalan tuberías de riego por goteo bajo el sustrato y sobre la capa drenante, sustituyendo la lámina filtrante por una lámina absorbente y de distribución de agua, además de tener propiedades filtrantes<sup>5</sup>. Se trata de una lámina compuesta por un fieltro poliacrílico y un tejido de fibras de polipropileno, con capacidad de absorción de agua de 3-4 L/m<sup>2</sup> aproximadamente<sup>6</sup>.

- 1 Tubería por goteo
- 2 Lámina absorbente + distribución de agua + filtrante

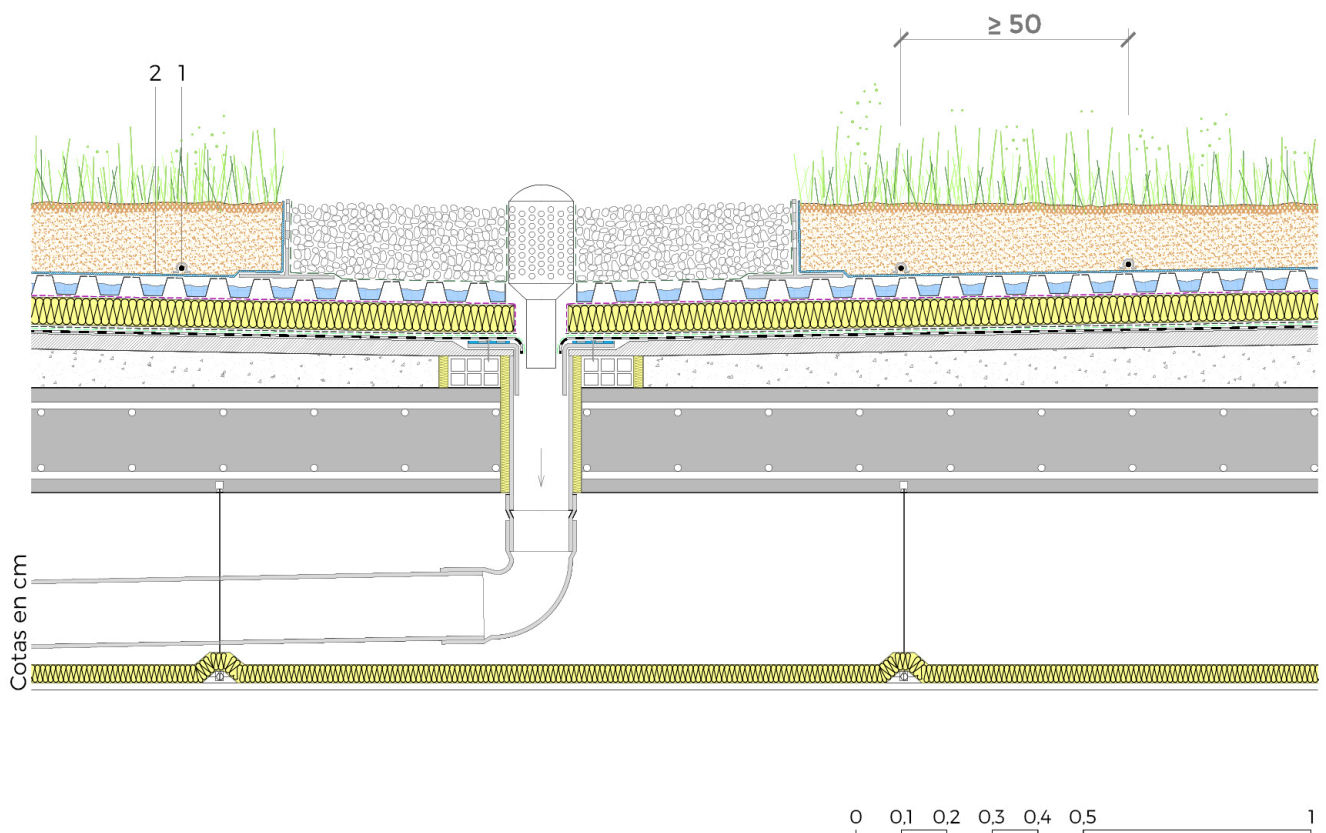


Figura 8.11. Detalle C con instalación de riego por capilaridad.

5 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021j.

6 ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021k.



## 8.2 DETALLES CONSTRUCTIVOS DE CUBIERTA INCLINADA

### 8.2.1 Detalle D. Cumbre

En la zona de la cumbre, se opta por emplear una pieza metálica conformando este punto singular, eliminando la vegetación de este punto con gran exposición al viento (Figura 8.12). Esta pieza metálica se anclará mediante una capa de mortero, asegurando su estabilidad, pero evitando que se agujeree la lámina impermeable antiraíces. El perfil metálico de cumbre se encuentra perforado en la parte superior y los dos laterales, favoreciendo la ventilación de la capa de sustrato y las raíces de la vegetación.

- 1 Fuelle central
- 2 Perfil metálico de cumbre perforado

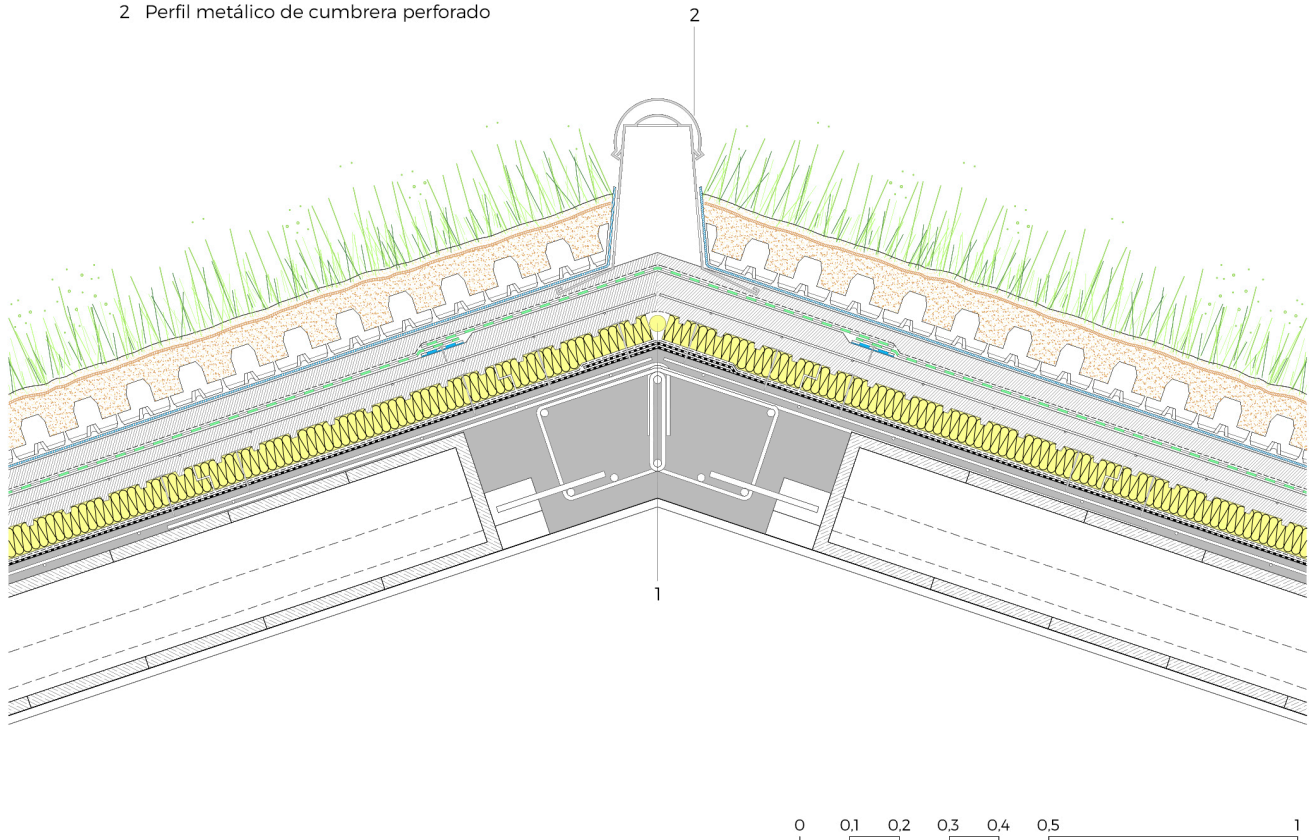


Figura 8.12. Detalle D.

### 8.2.2 Detalle E. Alero

Al tratarse de una cubierta inclinada con una pendiente aproximada del 30 % (Figura 8.13) es necesario diseñarla de acuerdo a las especificaciones propias para cubiertas con pendientes mayores al 30 % o elevada exposición al viento, estando del lado de la seguridad (véase apartado 4.2.1). En este caso se instalan estructuras de soporte y amarre en forma de panel de EPS nodular de altura aproximada 7,5 cm<sup>7</sup>. Esta capa, en función de su disposición, se puede emplear como capa retenedora de agua con función aislante (véase apartado 4.1.7.1) o, ubicando los nódulos más profundos hacia arriba (para que se introduzca en ellos el sustrato), como elemento de agarre para limitar el empuje del sustrato sobre el alero, limitando los problemas de deslizamiento (Figura 8.14). Además, se instala una lámina de yute en la parte superior del sustrato para protegerlo, especialmente, de la erosión. Para minimizar el número de capas del sistema, la lámina impermeable es en este caso también antiraíces. También se instala una lámina con funciones absorbentes, ya que el almacenamiento de agua es un problema grave a tener en cuenta en las cubiertas inclinadas. Respecto a la resolución del alero, se instala un perfil metálico perforado que permite desaguar en el canalón visto, sujetado mediante puntos de anclaje dispuestos a lo largo del alero (Figura 8.15).

<sup>7</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021l.

- |  |   |
|--|---|
| 1 Aislante térmico - EPS                 | 11 Canalón  |
| 2 Adhesivo de la malla sobre el aislante | 12 Perfil colaminado                                      |
| 3 Malla de fibra de vidrio (FV)          | 13 Punto de anclaje del perfil de alero                   |
| 4 Perfil de PVC goterón con malla de FV  | 14 Lámina impermeable y antiraíces - EPDM                 |
| 5 Adhesivo sobre la malla                | 15 Perfil metálico de alero perforado                     |
| 6 Imprimación y revestimiento de acabado | 16 Lámina absorbente + separación química + antiadherente |
| 7 Barrera de vapor                       | 17 Panel de soporte y amarre - EPS                        |
| 8 Aislante térmico ranurado              | 18 Substrato  |
| 9 Capa de mortero con mallazo            | 19 Lámina antierosión - Yute                              |
| 10 Gafa                                  | 20 Vegetación   |

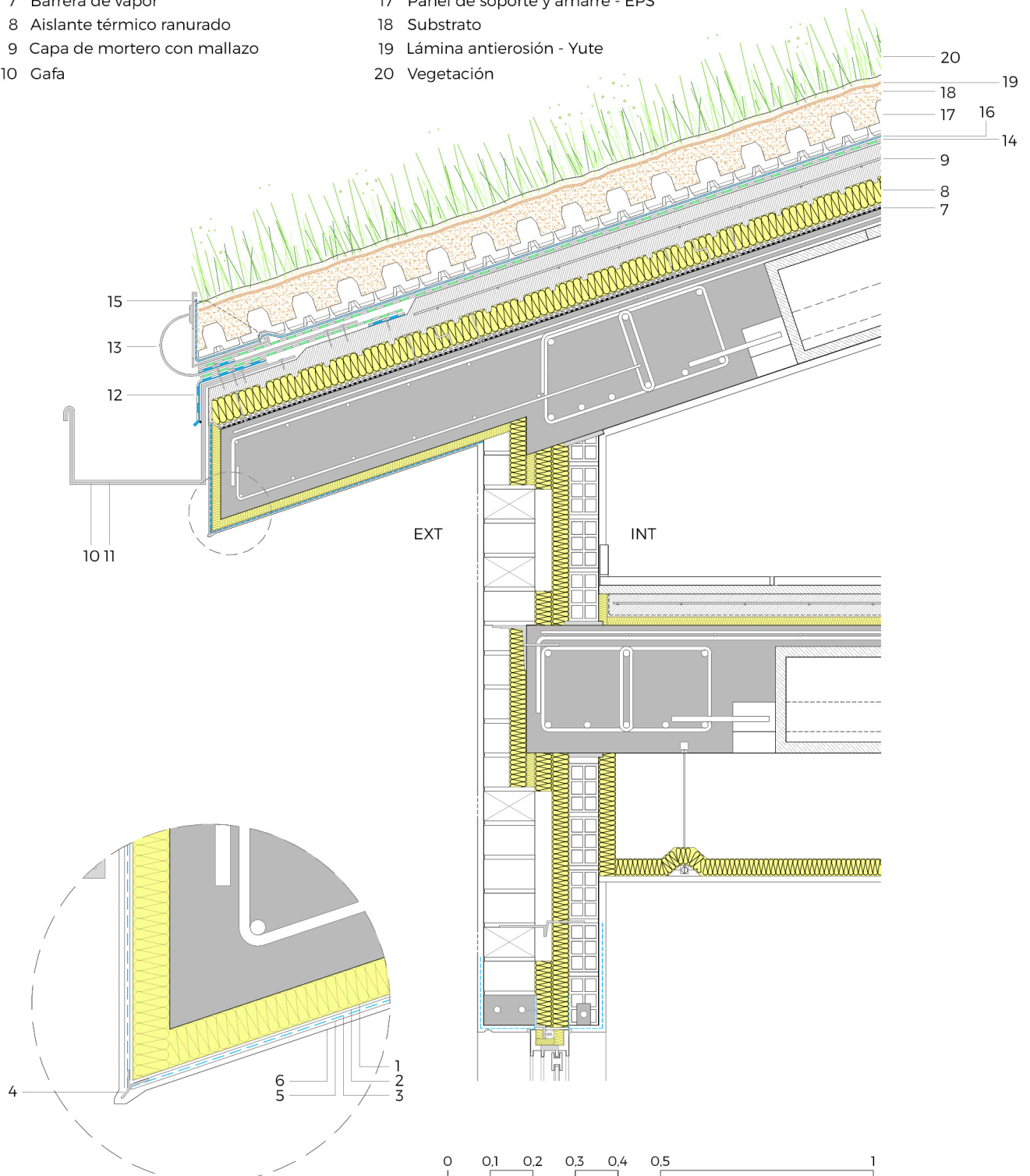


Figura 8.13. Detalle E con detalle de la resolución del goterón en el sistema SATE.

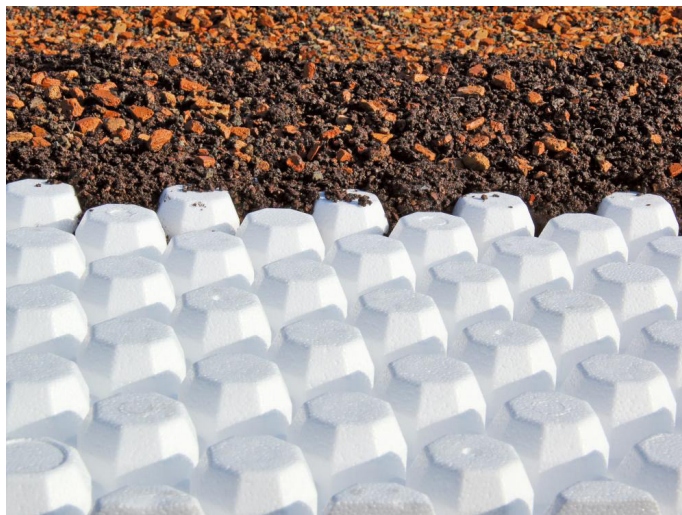


Figura 8.14. Panel de EPS nodular como elemento de agarre en cubiertas inclinadas.

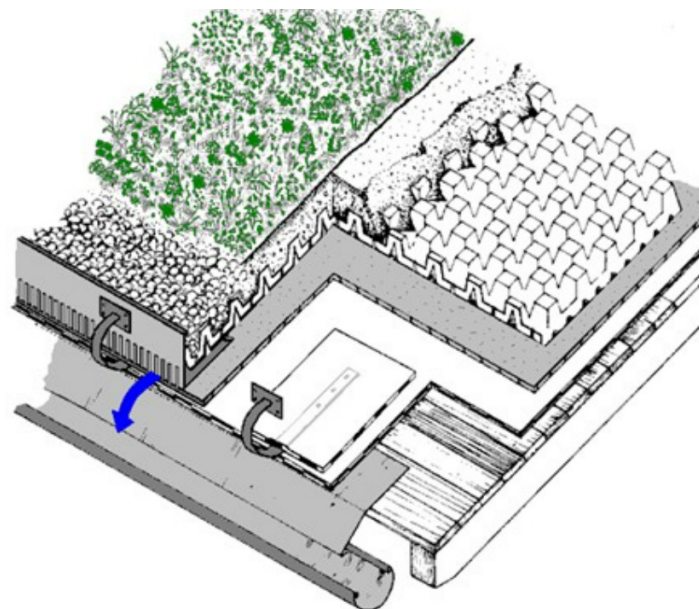


Figura 8.15. Resolución del alero con perfil metálico perforado con puntos de anclaje.

La adaptación de una cubierta existente a ajardinada y/o con zonas transitables implica, en gran parte de las ocasiones, dificultades constructivas para adaptarse a la normativa actual en vigor y a las necesidades de drenaje, mantenimiento o diseño de las cubiertas con acabado vegetal. Es importante considerar, a la hora de proyectar una rehabilitación con sustitución a cubierta ajardinada, cuestiones de peso propio, coste de construcción y comportamiento energético. Pero también como se van a resolver los diferentes encuentros y puntos singulares de esta cubierta, ya que una buena ejecución puede suponer beneficios económicos (reducción del coste de mantenimiento, un mejor funcionamiento térmico de la cubierta, etc.), sociales (posible uso transitable de la cubierta, correcto desarrollo de la vegetación y aumento de su valor estético, etc.) y ambientales (un correcto diseño de la capa drenante y los puntos de desagüe puede mejorar la retención de agua y la reducción de la escorrentía, aumentar la vida útil de la cubierta y reducir su energía incorporada a lo largo de todo este periodo, etc.). Por lo tanto, las particularidades constructivas deben considerarse como un paso más durante el planteamiento y estudio de las cubiertas ajardinadas, formando parte de la globalidad del proyecto.

**CONCLUSIONES**







## 9. CONCLUSIONES

### 9.1 APORTACIONES

Las cubiertas ajardinadas y su empleo responden a varias necesidades planteadas en la carrera sostenible de las sociedades modernas. Su comportamiento afecta a las tres dimensiones de la sostenibilidad (ambiental, económico y social), así como influye en su entorno a diferentes escalas. El comportamiento térmico y energético de las cubiertas ajardinadas depende de diversos factores, como la disponibilidad de agua, tratando de minimizar el consumo de un bien escaso, o la instalación en rehabilitación, con la intención de aprovechar recursos ya disponibles. En este contexto, las conclusiones generales que se extraen de esta tesis doctoral justifican el porqué del estudio, y su importancia desde una perspectiva sostenible, relacionándose con el objetivo principal que versaba sobre la relación entre el uso de cubiertas ajardinadas y los ODS:

- Factores climáticos, energéticos, sociales y económicos evidencian la necesidad de introducir conceptos de sostenibilidad en la arquitectura. La rehabilitación permite aprovechar recursos, edificios existentes, dándoles un nuevo uso y prolongando su vida útil, a la vez que se reduce su impacto energético y ambiental.
- Las cubiertas ajardinadas responden a las necesidades planteadas en varios Objetivos de Desarrollo Sostenible. Gran parte de los beneficios ambientales y sociales de las cubiertas ajardinadas son difícilmente cuantificables desde un punto de vista económico, pero repercuten de manera evidente a largo plazo sobre los usuarios de la ciudad. Por ello, es necesaria una estrategia de concienciación, mediante el estímulo desde las administraciones públicas al empleo de soluciones constructivas sostenibles.

Las fortalezas y debilidades de las cubiertas ajardinadas quedan patentes tras el amplio estudio desarrollado en los capítulos destinados al análisis del comportamiento térmico y energético, pero también las oportunidades que pueden ofrecer. En ambos capítulos se ha reflexionado y concluido sobre cuál es el modelo de cubierta ajardinada más adecuado y viable para instalar en el campo de la rehabilitación.

Se detallan a continuación las conclusiones extraídas de los capítulos 6 (Monitorización con sensores en modelos a escala) y 7 (Simulaciones energéticas con EnergyPlus y OpenStudio), estableciendo una relación entre estas aportaciones y los objetivos descritos en el apartado 1.2.

#### **Objetivo principal y objetivo secundario relacionados:**

- *Determinar el sistema de cubierta ajardinada óptimo para su uso en el campo de la rehabilitación en el clima mediterráneo.*
- *Determinar las variables más influyentes a la hora de valorar las cubiertas ajardinadas como soluciones constructivas de rehabilitación. Estas variables supondrán una base de trabajo para determinar el sistema de cubierta ajardinada óptimo en el campo de la rehabilitación.*
- Se identifican tres variables como las más influyentes a la hora de seleccionar los sistemas constructivos en el campo de la rehabilitación arquitectónica: el coste de construcción, el peso propio y el cumplimiento de los límites establecidos en el CTE DB-HE (transmitancia térmica).
- Una vivienda construida en las décadas de 1950-1960 puede soportar la carga aportada por una cubierta ajardinada extensiva. En cualquier caso, siempre es necesario hacer un estudio estructural preciso y concreto de cada edificio a rehabilitar.
- La cubierta ajardinada extensiva es la opción más viable en el campo de la rehabilitación, debido a su menor peso propio, coste de construcción, necesidades hídricas de su vegetación y su comportamiento energético.



### **Objetivo principal y objetivos secundarios relacionados:**

- *Analizar y conocer con mayor detalle el mecanismo de evapotranspiración en cubiertas ajardinadas autosuficientes.*
  - *Conocer el funcionamiento de programas informáticos de análisis energéticos aceptados por la normativa española en vigor, ampliando las herramientas disponibles para estudiar de forma detallada el comportamiento térmico y energético de las cubiertas ajardinadas.*
  - *Conocer el comportamiento térmico y energético real de las cubiertas ajardinadas autosuficientes en el clima mediterráneo. Combinado con el empleo de modelos informáticos permite profundizar en el funcionamiento del mecanismo de evapotranspiración en sí mismo.*
- Cómo resultado del complejo comportamiento térmico del sustrato y la vegetación, el cálculo manual, a partir de la conductividad térmica equivalente, no resulta suficientemente preciso. Por ello se emplea un programa de simulación energética que integra un modelo de cálculo más detallado y validado, el cual conlleva resultados suficientemente aproximados.
  - Se confirma la necesidad de escoger vegetación adaptada a las limitaciones del ambiente en cubiertas ajardinadas autosuficientes, sea cual sea el espesor de la capa de sustrato. Para el clima mediterráneo: vegetación con una elevada resistencia a la sequía y con pocas necesidades hídricas.
  - Se ha observado un 100 % de supervivencia del *sedum album*. El resto de la vegetación del género *sedum*, a pesar de presentar una mayor mortalidad, refloreció o mejoró su aspecto tras un periodo con mayores precipitaciones. Las especies arbustivas no reflorecieron, mientras que la *armeria marítima* fue la única de las especies que presentó una mortalidad del 100 %. En este caso, que se trate de especies de arbustos adaptados al clima mediterráneo no es un factor determinante para su supervivencia en una cubierta ajardinada autosuficiente.
  - La supervivencia y desarrollo de la vegetación juega un papel muy importante en la temperatura superficial alcanzada por el sustrato. Una mejor implantación y menor mortalidad supondría una mejora del comportamiento térmico de las cubiertas ajardinadas.
  - Se determina que el año de estudio de las maquetas ha sido un año típico. Los valores de temperatura, humedad relativa y precipitaciones se encuentran dentro de los valores normales de los últimos años. Por ello, los resultados obtenidos son generalizables a cualquier año que no resulte anómalo.
  - El uso de sensores de temperatura y humedad relativa permite detectar filtraciones o acumulaciones de agua en la cubierta.
  - Se reducen las pérdidas de calor por evaporación del sustrato a menor espesor y capacidad de almacenamiento.
  - Asimismo, a mayor contenido de humedad, menor amplitud térmica y densidad de datos en temperaturas altas, gracias a la disipación de calor por evapotranspiración.
  - Por otro lado, la inercia térmica aportada por el sustrato justifica que bajo los modelos a escala de las cubiertas ajardinadas se hayan registrado temperaturas menos extremas que en el caso de la cubierta tradicional con acabado de grava.
  - Se ha comprobado que el funcionamiento de las cubiertas ajardinadas autosuficientes como elemento enfriador depende directamente del contenido de agua. Un menor almacenamiento de agua disponible implica un comportamiento opuesto: como elemento aislante.
  - En épocas frías, la escasez de agua y las temperaturas superficiales más elevadas del modelo ajardinado extensivo implican unas ganancias de calor por la cubierta que pueden suponer un potencial ahorro energético en calefacción.
  - Es necesario evitar, en épocas de predominio del consumo energético de calefacción, que la temperatura superficial de la cubierta sea demasiado fría, alcanzando valores incluso por debajo de la temperatura ambiente.
  - Se ha comprobado que, en periodos posteriores a las lluvias, la evaporación del sustrato del modelo ajardinado extensivo se reduce principalmente entre el primer y segundo día tras las precipitaciones. En



el caso del modelo ajardinado intensivo, se reduce principalmente tras el segundo día, pero incluso al cuarto día después de las lluvias siguen produciéndose valores relevantes de evaporación al emplearse agua almacenada en capas más interiores de la cubierta.

- Se confirma la necesidad de instalar una mínima capa de material aislante que asegure el correcto funcionamiento térmico de la cubierta, especialmente en periodos en los que se produzca un mayor almacenamiento de agua en el sustrato y un aumento de su conductividad térmica.
- La mayor disponibilidad de agua en las cubiertas ajardinadas no implica, necesariamente, un mayor ahorro energético respecto al consumo total. En climas con elevada radiación solar es deseable un riego diario únicamente en épocas de predominio de refrigeración.

#### **Objetivo principal relacionado:**

- *Conocer las principales variables climáticas que influyen en las pérdidas de calor por evapotranspiración.*
- A menores temperaturas ambientales y mayores variaciones térmicas diarias y/o anuales se consigue un aumento del ahorro energético tanto al rehabilitar únicamente la cubierta de un edificio, así como al rehabilitar toda la envolvente térmica.
- Se ha confirmado que una menor temperatura ambiente implica una menor influencia de la cubierta en la disminución del consumo energético al rehabilitar la totalidad de la envolvente térmica de un edificio. En climas cálidos la influencia de la cubierta es igual o superior al 50 % debido a la elevada incidencia de la radiación solar sobre la cubierta. Por lo tanto, en este tipo de climas se considera como una opción viable realizar una rehabilitación únicamente de la cubierta o una rehabilitación en varias fases.
- En cambio, en climas fríos la influencia de la cubierta cae por debajo del 50 %. En este tipo de climas rehabilitar tan solo la cubierta no se considera una opción viable.
- En climas cálidos, se ha registrado un mayor ahorro energético, al rehabilitar la totalidad de la envolvente, instalando en cubierta el modelo ajardinado intensivo o el modelo con acabado de grava. En climas fríos la disminución del consumo energético es muy similar en los tres modelos, destacando discretamente el ahorro del modelo ajardinado extensivo. Esto último se debe a la menor influencia de la cubierta, y su sistema constructivo, en el ahorro energético conseguido en ubicaciones con temperaturas bajas.
- Se ha comprobado que las pérdidas de calor por evapotranspiración en sustrato y vegetación son mayores a mayor temperatura ambiente, describiendo las gráficas diarias de ambas variables un perfil simétrico.
- La mayor influencia en las pérdidas de calor por evapotranspiración en cubiertas ajardinadas autosuficientes recae sobre las altas temperaturas medias anuales del aire, mientras que las precipitaciones anuales no son determinantes si no van acompañadas de elevadas temperaturas y radiación solar.

#### **Objetivos secundarios relacionados:**

- *Analizar, desde un punto de vista económico, la reducción del consumo de energía y la viabilidad de las cubiertas ajardinadas. Las conclusiones obtenidas permitirán ampliar la información disponible por los profesionales del sector para valorar la viabilidad de las cubiertas ajardinadas en diferentes casos de rehabilitación.*
- *Determinar las variables constructivas y de entorno que juegan un papel importante en la demanda energética de una vivienda. Se amplía así la información disponible en relación con el potencial de ahorro energético al rehabilitar una vivienda, es decir, la posible reducción en su consumo de energía.*



- Los modelos ajardinados extensivo e intensivo autosuficientes consiguen un ahorro energético y económico similar, en un clima cálido y con elevada radiación solar, tras rehabilitar únicamente la cubierta.
- Para un edificio con 5 plantas o más, con poco o nulo aislamiento en la envolvente térmica, se considera que la instalación de una cubierta ajardinada extensiva en rehabilitación supondrá, por lo menos, un ahorro energético en el consumo total anual mayor al 2 %.
- Un aumento de la inercia de la envolvente térmica debe ir siempre acompañado de un aumento de la ventilación, especialmente en épocas cálidas.
- La mejora térmica del sistema constructivo de cubierta o de toda la envolvente permite conseguir relevantes ahorros energéticos. Aun así, el cumplimiento de los límites y exigencias del CTE DB-HE requiere de un enfoque desde diversas soluciones o actuaciones.



## 9.2 RECOMENDACIONES DE DISEÑO

Los beneficios derivados del uso de cubiertas ajardinadas, así como la mejora de su comportamiento térmico y energético, están directamente relacionados con el correcto diseño y ejecución del sistema constructivo. Del estudio gráfico realizado en el capítulo 8 (Detalles constructivos) de esta tesis doctoral se extraen las siguientes recomendaciones, relacionadas con el objetivo principal que planteaba la discusión sobre las soluciones constructivas de cubiertas ajardinadas más adecuadas en rehabilitación.

- Será necesario contemplar los futuros trabajos de mantenimiento, indispensables en cualquier cubierta ajardinada, desde la fase inicial de planteamiento constructivo del proyecto. Especialmente en el caso de cubiertas ajardinadas extensivas no transitables, en las que será imprescindible instalar puntos de anclaje que permitan realizar estos trabajos de manera segura.
- Prevalecerá la elección de barreras de protección, puntos de anclaje, elementos de mobiliario, etc. que puedan disponerse lastrados en lugar de anclados al forjado. Esto evitará la perforación de la lámina antiárces y la impermeabilización, así como los posibles problemas derivados.
- El espesor total de la cubierta ajardinada deberá considerarse desde fases tempranas del diseño. Las necesidades de algunas capas pueden producir un espesor mayor y cierta complejidad de resolución para evitar escalonamientos respecto al resto de zonas de la cubierta o al interior del edificio.
- Para mejorar el aprovechamiento del agua, se dispondrá la capa drenante continua a lo largo de toda la cubierta, incluso bajo las zonas pavimentadas, y con pendiente hacia las zonas ajardinadas. Esta estrategia de maximizar el almacenamiento y empleo del agua disponible en la cubierta también deberá tenerse en cuenta en puntos como las canaletas de recogida de agua o los perfiles de transición entre diferentes zonas.
- En el caso de emplear una capa drenante de paneles nodulares, cuando esta se extienda bajo la zona pavimentada, especialmente si se trata de un suelo flotante sobre plots, se recomienda su relleno con materiales granulares. En este caso, además de aumentar su resistencia a compresión, se mejorará la planeidad y se facilitará la instalación de los plots.
- En cubiertas inclinadas, la cumbrera se diseñará mediante un elemento o pieza que permita la ventilación para la correcta aireación del sustrato y las raíces de la vegetación. En el caso del alero, es igualmente recomendable disponer una pieza perforada que permita la ventilación, así como el drenaje del exceso de agua.



### 9.3 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El trabajo realizado en esta tesis doctoral plantea caminos no transcurridos y que resultan de gran interés. Se plantean a continuación las principales líneas que se pueden abordar en futuras investigaciones:

- El estudio de los beneficios ambientales que puede suponer la instalación de cubiertas ajardinadas a pequeña y media escala. El uso de simulaciones informáticas mediante el programa ENVI-met permitirá cuantificar estos beneficios ambientales, ampliando el estudio de las oportunidades y fortalezas de las cubiertas ajardinadas más allá de su comportamiento térmico y energético.
- La valoración y análisis de la introducción de diferentes soluciones que minimicen el consumo de energía primaria, alcanzando el cumplimiento de los requisitos establecidos por el CTE DB-HE. Especialmente valorar la instalación de paneles fotovoltaicos y/o de un sistema de aerotermia.
- La valoración y análisis del uso de soluciones de diseño o constructivas que minimicen el consumo de energía final. Así como valorar y cuantificar energéticamente el ahorro energético obtenido al instalar elementos de control solar, fachadas con cámara de aire ventilada, aumentar la ventilación, etc.
- El cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (K), de acuerdo con el CTE DB-HE, para las soluciones de rehabilitación planteadas en la presente tesis doctoral. Además, plantear la valoración del cumplimiento de la normativa y posibles modificaciones en caso de superar el límite establecido.
- Profundizar en el estudio de las fachadas vegetales, fundamentalmente en combinación con las cubiertas ajardinadas. En especial, centrarse en el análisis de los beneficios térmicos, energéticos y ambientales en aplicaciones combinadas de ambos sistemas ajardinados en la envolvente de los edificios.
- Ahondar en la influencia de la orientación del edificio en el consumo energético, analizando los consumos para diferentes orientaciones de una misma vivienda. Se plantea la posibilidad de extraer unas conclusiones generales que permitan aproximar el aumento en el consumo energético en función de la orientación principal del edificio.
- Analizar y valorar la influencia del viento como variable climatológica que afecta al comportamiento térmico y energético de las cubiertas ajardinadas. El estudio puede llevarse a cabo independientemente y en combinación con el resto de las variables consideradas en la presente tesis doctoral (temperatura ambiente, radiación solar y precipitaciones).
- El planteamiento de diversos estudios más detallados del comportamiento térmico y energético de las cubiertas ajardinadas en base a aplicaciones sobre tipologías edificatorias reales. Analizar la viabilidad de estas soluciones sobre edificios no solo residenciales, sino también educativos, sanitarios, administrativos, etc.

## REFERENCIAS





## REFERENCIAS

## R.1 FIGURAS

En este apartado se referencian las distintas figuras que aparecen en la tesis, organizadas por capítulos. Se indica la descripción de la figura, así como el autor y la procedencia.

<b>Portada</b>	Sección constructiva, en fases, de una cubierta ajardinada.	Elaboración propia.
<b>CAPÍTULO 2</b>		
Fig. 2.1	Temperaturas máximas y mínimas (°C) en Valencia (España), datos entre 1938-2021.	Elaboración propia. Datos de la fuente: AEMET. 2022.
Fig. 2.2	Evolución desde 1990 (sup.) y 2010 (inf.) del consumo de energía del total de todos los sectores y del sector de la edificación: residencial, terciario y tota (en miles de toneladas equivalentes de petróleo, Ktep).	Elaboración propia. Datos de la fuente: IDAE. 2019.
Fig. 2.3	Porcentaje de energía suministrada en España por fuente en 2020 (izq.) y distribución del consumo en 2019 (dcha.).	Elaboración propia. Datos de la fuente: International Energy Agency. 2022.
Fig. 2.4	Vista de la cubierta ajardinada del Observatorio del Medio Ambiente Urbano, Alicante (España).	Elaboración propia.
Fig. 2.5	Vista lateral, la vegetación dialoga con el Observatorio del Medio Ambiente Urbano, Alicante (España).	Elaboración propia.
Fig. 2.6	<i>Masdar Institut</i> , Masdar (Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos).	Fuente: <a href="https://www.fosterandpartners.com/projects/masdar-institute/">https://www.fosterandpartners.com/projects/masdar-institute/</a>
Fig. 2.7	Reinterpretación del <i>mashrabiya</i> característico de la arquitectura vernácula del lugar.	Fuente: <a href="https://www.fosterandpartners.com/projects/masdar-institute/">https://www.fosterandpartners.com/projects/masdar-institute/</a>
Fig. 2.8	<i>Siemens Middle East Headquarters</i> , Masdar (Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos).	Fuente: <a href="https://www.sheppardrobson.com/projects/siemens-middle-east-hq">https://www.sheppardrobson.com/projects/siemens-middle-east-hq</a>
Fig. 2.9	Estrategias de diseño pasivo para adaptación al clima: ventilación, luz natural y limitación de la incidencia solar directa.	Fuente: <a href="https://www.sheppardrobson.com/projects/siemens-middle-east-hq">https://www.sheppardrobson.com/projects/siemens-middle-east-hq</a>
Fig. 2.10	Cantidad de escorrentía de agua de lluvia en función del porcentaje de superficies impermeables.	Elaboración propia. Fuente: Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.
Fig. 2.11	Producción de un panel solar en función de la orientación (valores para España).	Elaboración propia. En base a la fuente: <a href="https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html">https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html</a>
Fig. 2.12	Inclinaciones para la máxima producción energética en verano y en invierno (valores para latitudes de 40 °, como Madrid o València, España).	Elaboración propia. En base a la fuente: <a href="https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html">https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html</a>



Fig. 2.13	Velocidad del aire ( $\bar{u}$ ) requerida para compensar el incremento de la temperatura.	Elaboración propia. Fuente: AENOR. 2006.
Fig. 2.14	<i>Landscape Park Duisburg Nord</i> (Duisburg, Alemania).	Fuente: <a href="https://www.latzundpartner.de/en/projekte/postindustrielle-landschaften/landschaftspark-duisburg-nord-de/">https://www.latzundpartner.de/en/projekte/postindustrielle-landschaften/landschaftspark-duisburg-nord-de/</a>
Fig. 2.15	El pasado industrial se renaturaliza tras quedar sin uso.	Fuente: <a href="https://www.latzundpartner.de/en/projekte/postindustrielle-landschaften/landschaftspark-duisburg-nord-de/">https://www.latzundpartner.de/en/projekte/postindustrielle-landschaften/landschaftspark-duisburg-nord-de/</a>
Fig. 2.16	Proyecto de edificio sostenible <i>Energy Hub</i> del estudio de arquitectura BIG.	Fuente: <a href="https://afasiaarchzine.com/2021/04/big-westbanks-energy-hub-san-jose/">https://afasiaarchzine.com/2021/04/big-westbanks-energy-hub-san-jose/</a>
Fig. 2.17	Vista de la zona ajardinada de la Plaza de Lisboa, en Oporto (Portugal).	Fuente: fotografía realizada por Carlos Lerma.
Fig. 2.18	<i>Open Gardens</i> , en Brno (República Checa).	Fuente: <a href="https://kampodomo.com/blog/5-impresionantes-edificios-con-cubiertas-vegetales/">https://kampodomo.com/blog/5-impresionantes-edificios-con-cubiertas-vegetales/</a>
Fig. 2.19	Posibles elementos de la Infraestructura Verde.	Fuente: Comisión Europea. 2014.
Fig. 2.20	Programa de impulso a la Infraestructura Verde, Barcelona (España).	Fuente: Ajuntament de Barcelona. 2022.
Fig. 2.21	<i>DakAkker</i> , en Róterdam (Países Bajos).	Fuente: <a href="https://www.ecointeligencia.com/2019/11/ciudades-cambio-climatico-roterdam/">https://www.ecointeligencia.com/2019/11/ciudades-cambio-climatico-roterdam/</a>
Fig. 2.22	Cubierta ajardinada en la <i>Seoul Library</i> , Seúl (Corea del Sud).	Fuente: <a href="http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20160603000686">http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20160603000686</a>
Fig. 2.23	Cubierta convencional no ventilada.	Elaboración propia.
Fig. 2.24	Cubierta invertida.	Elaboración propia.
Fig. 2.25	Cubierta ajardinada extensiva.	Elaboración propia.
Fig. 2.26	Cubierta ajardinada semiintensiva.	Elaboración propia.
Fig. 2.27	Cubierta ajardinada intensiva.	Elaboración propia.
Fig. 2.28	Jardines colgantes de Babilonia (Mesopotamia).	Fuente: <a href="https://sonparques.blogspot.com/2016/08/jardines-colgantes-de-babilonia-irak.html">https://sonparques.blogspot.com/2016/08/jardines-colgantes-de-babilonia-irak.html</a>
Fig. 2.29	Reconstrucción actual de la Villa de los Misterios (Pompeya, Italia).	Fuente: <a href="https://www.lavozdegalicia.es/noticia/cultura/2015/03/20/pompeya-recupera-enigmatica-villa-misterios/00031426874166159292979.htm">https://www.lavozdegalicia.es/noticia/cultura/2015/03/20/pompeya-recupera-enigmatica-villa-misterios/00031426874166159292979.htm</a>
Fig. 2.30	Jardin colgante detrás de la villa urbana y galería de paseo sobre la azotea. Manuscrito de París de Leonardo da Vinci.	Fuente: Llopis, M.T. 2010.



Fig. 2.31	Villa Hennebique (París, Francia).	Fuente: <a href="https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villa_Hennebique.jpg">https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Villa_Hennebique.jpg</a>
Fig. 2.32	<i>Maison Particulière</i> , proyecto no construido.	Fuente: <a href="http://unalhistoria3.blogspot.com/2014/02/maison-particuliere-theo-van-doesburg.html">http://unalhistoria3.blogspot.com/2014/02/maison-particuliere-theo-van-doesburg.html</a>
Fig. 2.33	Casa Schröder (Utrecht, Países Bajos).	Elaboración propia.
Fig. 2.34	Terraza-jardín de la Casa Doble (Stuttgart, Alemania).	Fuente: <a href="https://architecturalvisits.com/weissenhofmuseum-und-siedlung/">https://architecturalvisits.com/weissenhofmuseum-und-siedlung/</a>
Fig. 2.35	<i>Promenade architecturale</i> a través de las terrazas de la Villa Savoye (Poissy, Francia).	Fuente: fotografía realizada por Carlos Lerma.
Fig. 2.36	Cubiertas ajardinadas de los edificios bajos del <i>Rockefeller Center</i> (Nueva York, Estados Unidos).	Fuente: <a href="https://www.betsysphotos.com/gardens-and-landscape/landscape-architecture">https://www.betsysphotos.com/gardens-and-landscape/landscape-architecture</a>
Fig. 2.37	Cubierta del <i>Oakland Museum</i> (California, Estados Unidos).	Fuente: <a href="https://www.architectmagazine.com/project-gallery/the-oakland-museum_o">https://www.architectmagazine.com/project-gallery/the-oakland-museum_o</a>
Fig. 2.38	Biblioteca Universitaria de Delft (Países Bajos).	Elaboración propia.
Fig. 2.39	Cubierta aljibe y ajardinada del Ayuntamiento de Getafe (Madrid, España).	Fuente: Miranda, M.R. 1996.
Fig. 2.40	Terminal marítima de Yokohama (Japón).	Fuente: <a href="https://www.allcaddblocks.com/ad-classics-yokohama-international-passenger-terminal-foreign-office-architects-foa/">https://www.allcaddblocks.com/ad-classics-yokohama-international-passenger-terminal-foreign-office-architects-foa/</a>
Fig. 2.41	Museo de Historia de la Vendée (Francia).	Fuente: <a href="http://www.quincunx.es/2015/03/17/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-i/">http://www.quincunx.es/2015/03/17/sistemas-urbanos-de-drenaje-sostenible-i/</a>
Fig. 2.42	Proyecto para la estación intermodal de Gijón (España).	Fuente: <a href="https://www.elcomercio.es/multimedia/fotos/local/73844-mostramos-nueva-estacion-intermodal-gijon-2.html">https://www.elcomercio.es/multimedia/fotos/local/73844-mostramos-nueva-estacion-intermodal-gijon-2.html</a>
Fig. 2.43	Cubierta ajardinada en el conjunto de viviendas Halen (Berna, Suiza).	Elaboración propia.
Fig. 2.44	Residencia universitaria de L'Aquilone (Urbino, Italia).	Fuente: <a href="https://ifg.uniurb.it/2016/02/29/ducatto-online/cultura/viaggio-alla-scoperta-di-giancarlo-de-carlo-due-giorni-tra-le-opere-urbinate-dellarchitetto/139587/">https://ifg.uniurb.it/2016/02/29/ducatto-online/cultura/viaggio-alla-scoperta-di-giancarlo-de-carlo-due-giorni-tra-le-opere-urbinate-dellarchitetto/139587/</a>
Fig. 2.45	Línea temporal de cubiertas planas ajardinadas.	Elaboración propia.
Fig. 2.46	Torres residenciales <i>Bosco Verticale</i> (Milán, Italia).	Fuente: <a href="https://www.stefano-boeri-architetti.net/en/project/vertical-forest/">https://www.stefano-boeri-architetti.net/en/project/vertical-forest/</a>



Fig. 2.47	Cubiertas ajardinadas en el espacio privado de cada vivienda, a modo de balcón.	Fuente: <a href="https://www.stefanoeriarchitetti.net/en/project/vertical-forest/">https://www.stefanoeriarchitetti.net/en/project/vertical-forest/</a>
Fig. 2.48	Terrazas ajardinadas a diferentes niveles en el edificio <i>Espai Verd</i> (València, España).	Fuente: <a href="https://openhousevalencia.org/portfolio/espai-verd/">https://openhousevalencia.org/portfolio/espai-verd/</a>
Fig. 2.49	Visión desde el bosque del patio interior de manzana hacia las terrazas ajardinadas.	Fuente: <a href="https://openhousevalencia.org/portfolio/espai-verd/">https://openhousevalencia.org/portfolio/espai-verd/</a>
Fig. 2.50	<i>Biblioteca de Ciències Socials Gregori Maians</i> (València, España).	Fuente: <a href="https://arquites.wordpress.com/2003/06/14/biblioteca-universidad-de-valencia/">https://arquites.wordpress.com/2003/06/14/biblioteca-universidad-de-valencia/</a>
Fig. 2.51	Cubiertas ajardinadas como parte de la iniciativa <i>Ekostaden</i> (Malmö, Suecia).	Fuente: <a href="https://www.byplanlab.dk/byplanmoede2016/udflugter/udflugt12">https://www.byplanlab.dk/byplanmoede2016/udflugter/udflugt12</a>
Fig. 2.52	Sistema abierto de recogida de aguas pluviales en Augustenborg (Malmö, Suecia).	Fuente: <a href="https://ellenumanskaya.wordpress.com/2014/08/07/s7/">https://ellenumanskaya.wordpress.com/2014/08/07/s7/</a>
Fig. 2.53	Reducción del consumo de energía de origen fósil de acuerdo con el Desafío 2030.	Elaboración propia. Fuente: <a href="https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-community/a2725-what-is-aia-2030-commitment/">https://www.re-thinkingthefuture.com/architectural-community/a2725-what-is-aia-2030-commitment/</a>
Fig. 2.54	17 Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas.	Fuente: <a href="https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/">https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/</a>
Fig. 2.55	Costes acumulados asociados a la vida útil de un edificio convencional, uno energéticamente eficiente y uno sostenible. Se indica el diferencial del coste inicial de construcción de las tres opciones (izq.) y el diferencial del coste acumulado total, una vez llegados al final de su vida útil (dcha.).	Elaboración propia. Fuente: Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.
Fig. 2.56	Áreas de gestión evaluables en el sistema BREEAM.	Elaboración propia. En base a la fuente: Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.
Fig. 2.57	Categorías evaluables en el programa LEED.	Elaboración propia. En base a la fuente: Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.
Fig. 2.51	El programa LEED para planificaciones urbanas.	Elaboración propia. En base a la fuente: Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.
<b>CAPÍTULO 3</b>		
Fig. 3.1	Variación diaria del flujo de CO <sub>2</sub> sobre una pradera en los meses de crecimiento.	Elaboración propia. Fuente: Oke, T.R. 2002.
Fig. 3.2	Variación diaria de concentración de CO <sub>2</sub> para diferentes meses.	Elaboración propia. Fuente: Oke, T.R. 2002.



Fig. 3.3	Energía incorporada de los materiales de construcción.	Elaboración propia. En base a la fuente: Ching, F.D.K., Shapiro, I.M. 2015.
Fig. 3.4	Temperatura promedio por meses en València (España), datos en las décadas de 1950, 1980 y 2010.	Elaboración propia. Datos de la fuente: AEMET. 2022.
Fig. 3.5	Histórico de riadas documentadas en València (España).	Elaboración propia. Fuente: Lerma, C. 2012.
Fig. 3.6	Temperaturas máximas y mínimas absolutas en València (España), datos entre 1938-2010.	Elaboración propia. Datos de la fuente: AEMET. 2022.
Fig. 3.7	<i>East Campus of the Ogden International School, Chicago (Estados Unidos).</i>	Fuente: <a href="https://www.greenroofs.com/projects/ogden-international-school-of-chicago-east-campus/">https://www.greenroofs.com/projects/ogden-international-school-of-chicago-east-campus/</a>
Fig. 3.8	Huertos en las cubiertas de las favelas de Recife (Brasil).	Fuente: Álvarez, R.J. 2019.
<b>CAPÍTULO 4</b>		
Fig. 4.1	Sistema multicapa de una cubierta convencional.	Elaboración propia.
Fig. 4.2	Sistema multicapa de una cubierta invertida.	Elaboración propia.
Fig. 4.3	Relleno de los paños de la cubierta con el material de formación de pendientes.	Fuente: Mas, Á. 2020.
Fig. 4.4	Arcillas expandidas.	Elaboración propia.
Fig. 4.5	Capa de mortero de regularización para aportar planeidad a la superficie de acabado.	Fuente: Mas, Á. 2020.
Fig. 4.6	Colocación de la barrera de vapor en función del material de la formación de pendientes.	Elaboración propia.
Fig. 4.7	Barrera de vapor mediante reutilización de láminas impermeables bituminosas existentes en una cubierta convencional	Elaboración propia.
Fig. 4.8	Envoltorio térmico, espacios habitables (Hab.) y no habitables (N.Hab.).	Elaboración propia.
Fig. 4.9	Materiales aislantes más comercializados y su posible ubicación.	Elaboración propia.
Fig. 4.10	Impermeabilización de cubierta plana con rollos de LBM de 1 m de ancho.	Fuente: Mas, Á. 2020.
Fig. 4.11	Impermeabilización de cubierta plana mantas de EPDM de grandes dimensiones.	Fuente: <a href="https://www.socyr.com/proyectos/epdm-pegado-perimetral-valencia/">https://www.socyr.com/proyectos/epdm-pegado-perimetral-valencia/</a>
Fig. 4.12	Lámina antiraíces de polietileno, espesor aproximado de 0,34 mm y masa de 320 gr/m <sup>2</sup> .	Elaboración propia.
Fig. 4.13	Aliviaderos en lámina drenante de paneles nodulares plásticos, con detalle.	Elaboración propia.
Fig. 4.14	Capa drenante realizada con materiales granulares, con disposición de capa separadora antipunzonante bajo ella.	Elaboración propia.
Fig. 4.15	Capa drenante realizada con paneles nodulares plásticos con aliviaderos en la parte superior.	Fuente: <a href="https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-478540.html">https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-478540.html</a>
Fig. 4.16	Capa drenante y substrato realizadas con lana de roca.	Fuente: <a href="https://www.facebook.com/phytokinetic/?ref=page_internal">https://www.facebook.com/phytokinetic/?ref=page_internal</a>



Fig. 4.17	Cubierta ajardinada ligera en la cubierta de un autobús, empleando lana de roca.	Fuente: <a href="https://www.facebook.com/phytokinetic/?ref=page_internal">https://www.facebook.com/phytokinetic/?ref=page_internal</a>
Fig. 4.18	Capa drenante realizada con paneles nodulares rellenos con material granular.	Elaboración propia.
Fig. 4.19	Capa retenedora de agua de fibras de poliéster/polipropileno, de espesor aproximado 6 mm y una capacidad de retención de agua de 4 L/m <sup>2</sup> .	Fuente: <a href="https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-481758.html">https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-481758.html</a>
Fig. 4.20	Panel rígido de EPS, de espesor aproximado 75 mm: colocación inferior para retención de agua (capacidad de retención de agua de 3 L/m <sup>2</sup> ) o colocación superior en cubiertas inclinadas.	Fuente: <a href="https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-1711510.html">https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-1711510.html</a>
Fig. 4.21	Depósito de retención de agua en una cubierta ajardinada aljibe o <i>polder roof</i> .	Elaboración propia.
Fig. 4.22	Lámina filtrante de polipropileno, O <sub>90</sub> 95 µm y una densidad de 100 gr/m <sup>2</sup> .	Fuente: <a href="https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-1134205.html">https://www.archiexpo.es/prod/zinco-gmbh/product-66390-1134205.html</a>
Fig. 4.23	Protección del sustrato frente a la erosión mediante mallas tridimensionales.	Fuente: <a href="https://jardineriaoliva.com/cubierta-vegetal-rapitan/">https://jardineriaoliva.com/cubierta-vegetal-rapitan/</a>
Fig. 4.24	Composición de sustrato para cubierta ajardinada con materiales inorgánicos (cerámica y otros componentes minarles triturados) y orgánicos (compost vegetal y turba rubia).	Elaboración propia.
Fig. 4.25	Control de la erosión superficial mediante el uso de malla de coco (dcha.).	Fuente: <a href="https://jardineriaoliva.com/cubierta-vegetal-rapitan/">https://jardineriaoliva.com/cubierta-vegetal-rapitan/</a>
Fig. 4.26	<i>Coco-peat</i> para su uso en sustratos de cubiertas ajardinadas extensivas.	Fuente: <a href="https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1373967494-100-lts-fibra-de-coco-sustrato-plantas-_JM">https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-1373967494-100-lts-fibra-de-coco-sustrato-plantas-_JM</a>
Fig. 4.27	Tipos de capas separadoras de acuerdo con su ubicación respecto a la lámina impermeable (IMP), el material aislante (AIS) y la barrera de vapor (BV).	Elaboración propia.
Fig. 4.28	Capa separadora antiadherente y por incompatibilidad química, realizada con polipropileno (PP).	Elaboración propia.
Fig. 4.29	Varietades vegetales: <i>Iris lutescens</i> , vivacea (A); <i>Sedum album</i> , suculenta (B); <i>Pennisetum clandestinum</i> , herbácea perennifolia/cespitosa (C); <i>Santolina chamaecyparissus</i> , subarbustiva (D); <i>Rosmarinus officianilis</i> , arbustiva (E); <i>Cercis siliquastrum</i> , arbórea (F).	Fuente: <a href="http://floracatalana.cat/flora/">http://floracatalana.cat/flora/</a> ; <a href="http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm">http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm</a>
Fig. 4.30	Especies vegetales alternativas al uso del sedum: <i>Stachys byzantine</i> (A), <i>Portulaca grandiflora</i> (B), <i>Aptenia cordiflora</i> (C).	Fuente: <a href="http://floracatalana.cat/flora/">http://floracatalana.cat/flora/</a> ; <a href="https://www.floresyplantas.net/category/flores-plantas/">https://www.floresyplantas.net/category/flores-plantas/</a>
Fig. 4.31	Placas nodulares de EPS (sup.) y barreras antiempuje (inf.) para cubiertas inclinadas.	Fuente: <a href="https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/no-solamente-el-vino-espanol-es-exclusivo">https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/no-solamente-el-vino-espanol-es-exclusivo</a>
Fig. 4.32	Relleno entre maestras de ladrillo para conformar la pendiente de la cubierta plana.	Fuente: Mas, Á. 2020.



Fig. 4.33	Solape de láminas EPDM en función del sistema de colocación.	Elaboración propia. Fuente: AENOR. 2009.
Fig. 4.34	Prueba de estanqueidad una vez instaladas las láminas impermeables de EPDM.	Fuente: <a href="https://www.socyr.com/proyectos/epdm-pegado-perimetral-valencia/">https://www.socyr.com/proyectos/epdm-pegado-perimetral-valencia/</a>
Fig. 4.35	Bandejas modulares precultivadas.	Fuente: <a href="https://ecogrid.co.uk/products/ecogrid-green-roofs/">https://ecogrid.co.uk/products/ecogrid-green-roofs/</a>
Fig. 4.36	Tepes o mantas precultivadas.	Fuente: <a href="https://www.sempergreen.com/es/sobre-sempergreen/noticias/los-tepes-de-sedum-la-alternativa-ideal-a-los-alveolos-y-esquejes-en-cubiertas-verdes">https://www.sempergreen.com/es/sobre-sempergreen/noticias/los-tepes-de-sedum-la-alternativa-ideal-a-los-alveolos-y-esquejes-en-cubiertas-verdes</a>
Fig. 4.37	Instalación de vegetación mediante hidrosiembra.	Fuente: <a href="https://hidrosiembrachile.cl/servicios/hidrosiembra/">https://hidrosiembrachile.cl/servicios/hidrosiembra/</a>
Fig. 4.38	Instalación de vegetación mediante elementos o bandejas precultivadas.	Fuente: <a href="https://www.sempergreen.com/en/solutions/green-roofs/installation">https://www.sempergreen.com/en/solutions/green-roofs/installation</a>
Fig. 4.39	<i>Pennisetum clandestinum</i> (izq.), <i>Aptenia cordifolia</i> (dcha.).	Fuente: <a href="http://floracatalana.cat/flora/">http://floracatalana.cat/flora/</a> ; <a href="http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm">http://www.conabio.gob.mx/malezasdemexico/2inicio/paginas/lista-plantas-generos.htm</a>
Fig. 4.40	<i>Armeria marítima</i> (izq.), <i>Iris lutescens</i> (dcha.).	Fuente: <a href="http://floracatalana.cat/flora/">http://floracatalana.cat/flora/</a>
Fig. 4.41	<i>Centranthus ruber</i> (A), <i>Santolina rosmarinifolia</i> (B) y <i>Helichrysum stoechas</i> (C).	Fuente: <a href="http://floracatalana.cat/flora/">http://floracatalana.cat/flora/</a>
Fig. 4.42	<i>Limonium virgatum</i> (A), <i>Frankenia leavis</i> (B) y <i>Thymus serpyllum</i> (C).	Fuente: <a href="http://floracatalana.cat/flora/">http://floracatalana.cat/flora/</a>
Fig. 4.43	Encuentro de cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida con paramento vertical, remate de lámina impermeable con perfil colaminado. Detalle de la unión de la lámina impermeable principal de la cubierta y la lámina de refuerzo superior, mediante perfil colaminado (azul).	Elaboración propia.
Fig. 4.44	Encuentro de cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida con sumidero con paragravillas. Detalle del anclaje perimetral de la lámina impermeable de la cubierta alrededor del sumidero con perfil colaminado (azul).	Elaboración propia.
Fig. 4.45	Encuentro de cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida con canalón con paragravillas.	Elaboración propia.
Fig. 4.46	Junta de dilatación estructural en cubierta ajardinada extensiva o semiintensiva invertida. Detalle de la unión de la lámina impermeable principal de la cubierta y la lámina de refuerzo superior, mediante perfil colaminado (azul).	Elaboración propia.
Fig. 4.47	Encuentro de cubierta ajardinada intensiva invertida con paramento vertical, remate de lámina impermeable con perfil colaminado.	Elaboración propia.



Fig. 4.48	Encuentro de cubierta ajardinada intensiva invertida con sumidero.	Elaboración propia.
Fig. 4.49	Junta de dilatación estructural en cubierta ajardinada intensiva invertida.	Elaboración propia.
Fig. 4.50	Cubierta con solado flotante no aislante sobre plots.	Fuente: Mas, Á. 2020.
Fig. 4.51	Sumidero en zona con pavimento flotante en cubierta invertida, con continuidad de capa drenante y lámina filtrante.	Elaboración propia.
Fig. 4.52	Sumidero en zona con pavimento flotante en cubierta invertida, sin continuidad de capa drenante y lámina filtrante.	Elaboración propia.
Fig. 4.53	Sumidero en zona con losa filtrante en cubierta invertida, con continuidad de capa drenante y lámina filtrante.	Elaboración propia.
Fig. 4.54	Sumidero en zona con losa filtrante en cubierta invertida, sin continuidad de capa drenante y lámina filtrante.	Elaboración propia.
Fig. 4.55	Cubierta con losa filtrante.	Fuente: Mas, Á. 2020.
Fig. 4.56	Zonas de protección sin vegetación.	Elaboración propia. Fuente: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.
Fig. 4.57	Ejemplos de combinación de grava con baldosas, en el perímetro de una cubierta.	Elaboración propia. Fuente: Zimmermann, A. 2015.
Fig. 4.58	Zona de sumidero con paragavillas en cubierta de grava.	Fuente: Mas, Á. 2020.
Fig. 4.59	Vivienda Earthship en Gamerco, Nuevo México (Estados Unidos).	Fuente: Kruis, N.J., Heun, M.K. 2007.
Fig. 4.60	Muro de contención con ruedas de vehículo en desuso.	Fuente: Kruis, N.J., Heun, M.K. 2007.
Fig. 4.61	Vivienda Earthship en Taos, Nuevo México (Estados Unidos).	Fuente: Freney, M., Soebarto, V., Williamson, T. 2013.
Fig. 4.62	Fachada vegetal con sistema directo.	Fuente: Manso, M., Castro-Gomes, J. 2015.
Fig. 4.63	Fachada vegetal con sistema indirecto.	Fuente: Manso, M., Castro-Gomes, J. 2015.
Fig. 4.64	Cubierta ajardinada con paneles fotovoltaicos.	Fuente: ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.
Fig. 4.65	Temperaturas registradas en diferentes módulos fotovoltaicos en un día del mes de julio.	Elaboración propia. Fuente: ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.
Fig. 4.66	Cubierta ajardinada extensiva con sistema de anclaje de paneles fotovoltaicos lastrado (sin penetración).	Elaboración propia. En base a la fuente: ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.
Fig. 4.67	Encuentro de cubierta aljibe con paramento vertical.	Elaboración propia.
Fig. 4.68	Detalle general de una cubierta aljibe extensiva (o <i>polder roof</i> ).	Elaboración propia. En base a la fuente: Paradela, M.L.S. 2020d.
<b>CAPÍTULO 5</b>		
Fig. 5.1	Sistema multicapa de una cubierta ajardinada extensiva.	Elaboración propia.
Fig. 5.2	Sistema multicapa de una cubierta ajardinada semiintensiva.	Elaboración propia.





Fig. 5.3	Sistema multicapa de una cubierta ajardinada intensiva convencional.	Elaboración propia.
Fig. 5.4	Sistema multicapa de una cubierta ajardinada intensiva invertida.	Elaboración propia.
Fig. 5.5	Sistema multicapa de un huerto en una cubierta ajardinada.	Elaboración propia.
Fig. 5.6	Sistema multicapa de una cubierta ajardinada extensivas convencional con paneles fotovoltaicos.	Elaboración propia. En base a la fuente: ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.
Fig. 5.7	Sistema multicapa de una cubierta ajardinada extensivas invertida con paneles fotovoltaicos.	Elaboración propia. En base a la fuente: ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021c.
Fig. 5.8	Sistema multicapa de una cubierta aljibe.	Elaboración propia.
Fig. 5.9	Sistema multicapa de una <i>polder roof</i> .	Elaboración propia. En base a la fuente: Paradela, M.L.S. 2020d.
<b>CAPÍTULO 6</b>		
Fig. 6.1	Detalle constructivo del modelo de referencia - modelo A.	Elaboración propia.
Fig. 6.2	Detalle constructivo del modelo 1 - modelo B.	Elaboración propia.
Fig. 6.3	Detalle constructivo del modelo 4 - modelo C.	Elaboración propia.
Fig. 6.4	Impacto ambiental orientativo a lo largo de la vida útil de una cubierta.	Elaboración propia. Fuente: TEGNOS Research. 2010.
Fig. 6.5	Índice GWP para las diferentes soluciones impermeabilizantes.	Elaboración propia. Fuente: TEGNOS Research. 2010.
Fig. 6.6	<i>Sedum album</i> .	Elaboración propia.
Fig. 6.7	<i>Sedum spurium</i> .	Elaboración propia.
Fig. 6.8	<i>Sedum spurium var. coccineum</i> .	Elaboración propia.
Fig. 6.9	Distribución de las especies y variedades en el modelo B.	Elaboración propia.
Fig. 6.10	Especies y variedades en el modelo B: estado a 10/06/2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.11	<i>Armeria marítima</i> .	Elaboración propia.
Fig. 6.12	<i>Santolina chamaecyparissus</i> .	Elaboración propia.
Fig. 6.13	<i>Thymus vulgaris</i> .	Elaboración propia.
Fig. 6.14	Distribución de las tres especies en el modelo C.	Elaboración propia.
Fig. 6.15	Especies y variedades en el modelo C: estado a 10/06/2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.16	Cajones de madera con diferentes alturas para cada modelo y del nivel del suelo.	Elaboración propia.
Fig. 6.17	Abertura lineal en la base del cajón de madera del modelo A para evacuación de agua.	Elaboración propia.
Fig. 6.18	Abertura lineal en el lateral del cajón de madera del modelo A para instalación de sondas.	Elaboración propia.
Fig. 6.19	Colocación de la lámina impermeable EPDM, sistema no adherido, en el modelo A.	Elaboración propia.
Fig. 6.20	Colocación de los paneles machiembrados de XPS en el modelo A, sobre capa separadora por incompatibilidad química y antiadherente.	Elaboración propia.



Fig. 6.21	Colocación de capa drenante de paneles nodulares (izq.) y lámina filtrante (dcha.) en el modelo B.	Elaboración propia.
Fig. 6.22	Instalación del sustrato (izq.) y de la vegetación con especies <i>sedum</i> (dcha.) en el modelo B.	Elaboración propia.
Fig. 6.23	Modelos A, B y C terminados (de dcha. a izq.).	Elaboración propia.
Fig. 6.24	<i>Data-logger</i> TH1165 (izq.) y sonda exterior (dcha.).	Elaboración propia.
Fig. 6.25	Agrupación de <i>data-loggers</i> en caja lateral, facilitando la toma de datos.	Elaboración propia.
Fig. 6.26	Conducto de tubo corrugado para sonda exterior del <i>data-logger</i> B3, sobre lámina filtrante.	Elaboración propia.
Fig. 6.27	Ubicación y nomenclatura de las sondas del modelo A.	Elaboración propia.
Fig. 6.28	Ubicación y nomenclatura de las sondas del modelo B.	Elaboración propia.
Fig. 6.29	Ubicación y nomenclatura de las sondas del modelo C.	Elaboración propia.
Fig. 6.30	Control del estado de la vegetación en los modelos B (izq.) y C (dcha.).	Elaboración propia.
Fig. 6.31	<i>Sedum Sediforme</i> : estado a 06/04/2022 (izq.) y 06/05/2022 (dcha.).	Elaboración propia.
Fig. 6.32	Temperatura media diaria (°C) en la estación del Campus de Vera de la UPV (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.33	Humedad relativa media diaria (%) en la estación del Campus de Vera de la UPV (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.34	Precipitaciones totales diarias (mm) en la estación del Campus de Vera de la UPV (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.35	Radiación solar global máxima diaria (W/m <sup>2</sup> ) en la estación del Aeropuerto (València, España) del 01/06/2021 al 31/05/2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.36	Diagrama de cajas con la distribución de los datos de temperatura (°C) por sonda y por maqueta del 01/06/2021 al 31/05/2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.37	Diagrama de cajas con la distribución de los datos de humedad relativa (%) por sonda y por maqueta del 01/06/2021 al 31/05/2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.38	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de junio.	Elaboración propia.
Fig. 6.39	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de julio.	Elaboración propia.
Fig. 6.40	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de agosto.	Elaboración propia.
Fig. 6.41	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de septiembre.	Elaboración propia.



Fig. 6.42	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de octubre.	Elaboración propia.
Fig. 6.43	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de noviembre.	Elaboración propia.
Fig. 6.44	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de diciembre.	Elaboración propia.
Fig. 6.45	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de enero.	Elaboración propia.
Fig. 6.46	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de febrero.	Elaboración propia.
Fig. 6.47	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de marzo.	Elaboración propia.
Fig. 6.48	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de abril.	Elaboración propia.
Fig. 6.49	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el mes de mayo.	Elaboración propia.
Fig. 6.50	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.51	Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.52	Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.53	Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.54	Temperatura (°C) superficial de la maqueta A, temperatura ambiente y radiación solar para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.55	Temperatura (°C) superficial de la maqueta B, temperatura ambiente y radiación solar para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.56	Temperatura (°C) superficial de la maqueta C, temperatura ambiente y radiación solar para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.57	Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.58	Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.59	Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 12 de julio de 2021.	Elaboración propia.
Fig. 6.60	Diagrama de dispersión con la distribución de los datos por humedad relativa (%) y temperatura (°C) por maqueta para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.



Fig. 6.61	Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.62	Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.63	Humedad relativa (%) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.64	Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta A para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.65	Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta B para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.66	Temperatura (°C) por horas de las sondas de la maqueta C para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.67	Temperatura (°C) superficial de la maqueta A, temperatura ambiente y radiación solar para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.68	Temperatura (°C) superficial de la maqueta B, temperatura ambiente y radiación solar para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.69	Temperatura (°C) superficial de la maqueta C, temperatura ambiente y radiación solar para el día 18 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.70	Precipitaciones totales diarias (mm) del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.71	Radiación solar máxima diaria (W/m <sup>2</sup> ) del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.72	Temperatura media diaria (°C) del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.73	Humedad relativa media diaria (%) del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.74	Diagrama de puntos con datos de humedad relativa (%) por sonda de la maqueta A del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.75	Diagrama de puntos con datos de temperatura (°C) por sonda de la maqueta A del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.76	Diagrama de puntos con datos de humedad relativa (%) por sonda de la maqueta B del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.77	Diagrama de puntos con datos de temperatura (°C) por sonda de la maqueta B del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.78	Diagrama de puntos con datos de humedad relativa (%) por sonda de la maqueta C del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 6.79	Diagrama de puntos con datos de temperatura (°C) por sonda de la maqueta C del 20 al 29 de enero de 2022.	Elaboración propia.

**CAPÍTULO 7**

Fig. 7.1	Consumo energético de refrigeración (azul) y calefacción (rojo) (MBtu) junto a temperatura ambiente (°F) del modelo del TFG (sup.) y del modelo reproducido para la validación (inf.)*.	Superior. Fuente: Bofill, N.C. 2017. / Inferior. Elaboración propia.
Fig. 7.2	Consumo de energía final y suministrada total, por m <sup>2</sup> y por m <sup>2</sup> acondicionado del modelo del TFG*.	Fuente: Bofill, N.C. 2017.
Fig. 7.3	Consumo de energía final y suministrada total, por m <sup>2</sup> y por m <sup>2</sup> acondicionado del modelo reproducido para la validación*.	Elaboración propia.



Fig. 7.4	Temperatura superficial exterior (°C) de la maqueta (Sonda B4) y de la simulación energética (Simulación Modelo B) entre el 20 y el 27 de enero de 2022.	Elaboración propia.
Fig. 7.5	Vivienda unifamiliar adosada: distribución de espacios interiores y dimensiones (m <sup>2</sup> ).	Elaboración propia.
Fig. 7.6	Vivienda en edificio residencial: distribución de espacios interiores y dimensiones (m <sup>2</sup> ). Primera planta, cota + 3,65 m.	Elaboración propia.
Fig. 7.7	Modelos propuestos para rehabilitar la cubierta.	Elaboración propia.
Fig. 7.8	Mapa de zonas climáticas en España con ubicación de las seis ciudades escogidas.	Elaboración propia. En base a la fuente: Lerma, C. 2020.
Fig. 7.9	Ahorro energético (kWh) en relación con el consumo de energía final total anual del modelo de referencia, para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).	Elaboración propia.
Fig. 7.10	Influencia de la cubierta respecto al total de la envolvente (%) en relación con el ahorro energético obtenido tras rehabilitar en ambos supuestos, para cada sistema de cubierta (A-B-C). Temperatura media anual (°C) de las ciudades.	Elaboración propia.
Fig. 7.11	Porcentaje (%) de ahorro energético respecto al consumo de energía final anual del modelo de referencia para el modelo B y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).	Elaboración propia.
Fig. 7.12	Temperaturas superficiales exteriores del modelo A, el día 6 de febrero a las 15:00 h: fachada sur 53,13 °C, fachada oeste 38,52 °C, fachada norte 22,32 °C y cubierta 30,76 °C. El eje verde indica el norte.	Elaboración propia.
Fig. 7.13	Temperaturas superficiales interiores del modelo A, el día 6 de febrero a las 15:00 h: ventanas de fachada sur 31,96 °C, ventanas de fachada oeste 28,69 °C y ventanas de fachada norte 23,77 °C*. El eje verde indica el norte.	Elaboración propia.
Fig. 7.14	Temperatura del aire (°C) en cada una de las zonas térmicas del modelo A para el periodo del 6 al 9 de febrero. La leyenda de colores se encuentra en la tabla 7.28.	Elaboración propia.
Fig. 7.15	Horario de uso de equipos eléctricos en la cocina, para los días entresemana (L-M-X-J-V).	Elaboración propia.
Fig. 7.16	Temperaturas (°C) del aire (amarillo), superficial exterior (azul) y superficial interior (rojo) de la fachada sur del salón, para el periodo del 23 al 26 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.17	Temperaturas superficiales interiores del modelo A, el día 24 de julio a las 21:00 h: el color verde-amarillento indica temperaturas superiores a las de las superficies en color verde*.	Elaboración propia.
Fig. 7.18	Condiciones ambientales durante los días 4 a 7 de enero: temperatura ambiente (°C) en azul y radiación solar (W/m <sup>2</sup> ) en amarillo.	Elaboración propia.



Fig. 7.19	Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.20	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.21	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero. Consumo energético del sistema de calefacción (W) en rojo.	Elaboración propia.
Fig. 7.22	Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.23	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.24	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero. Consumo energético del sistema de calefacción (W) en rojo.	Elaboración propia.
Fig. 7.25	Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.26	Pérdidas de calor por evapotranspiración (W/m <sup>2</sup> ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.27	Pérdidas de calor por evapotranspiración (W/m <sup>2</sup> ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 19 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.28	Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B durante los días 4 a 19 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.29	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo B en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.30	Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.31	Pérdidas de calor por evapotranspiración (W/m <sup>2</sup> ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.32	Pérdidas de calor por evapotranspiración (W/m <sup>2</sup> ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 19 de enero.	Elaboración propia.



Fig. 7.33	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo C en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 4 a 7 de enero.	Elaboración propia.
Fig. 7.34	Condiciones ambientales durante los días 20 a 23 de julio: temperatura ambiente (°C) en azul y radiación solar (W/m <sup>2</sup> ) en amarillo.	Elaboración propia.
Fig. 7.35	Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.36	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.37	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo de referencia en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio. Consumo energético del sistema de refrigeración (W) en rojo.	Elaboración propia.
Fig. 7.38	Temperatura superficial exterior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.39	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.40	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo A en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio. Consumo energético del sistema de refrigeración (W) en rojo.	Elaboración propia.
Fig. 7.41	Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.42	Pérdidas de calor por evapotranspiración (W/m <sup>2</sup> ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.43	Pérdidas de calor por evapotranspiración (W/m <sup>2</sup> ) en el sustrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo B y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 de julio a 4 de agosto.	Elaboración propia.
Fig. 7.44	Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo B durante los días 20 de julio a 4 de agosto.	Elaboración propia.
Fig. 7.45	Temperatura superficial interior (°C) de la cubierta del modelo B en amarillo y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.46	Temperatura superficial exterior (°C) del sustrato (amarillo) y la vegetación (rojo) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente (°C) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.



Fig. 7.47	Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en el substrato (verde claro) y en la vegetación (verde oscuro) de la cubierta del modelo C y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.48	Temperatura superficial interior ( $^{\circ}C$ ) de la cubierta del modelo C en amarillo y temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ ) en azul durante los días 20 a 23 de julio.	Elaboración propia.
Fig. 7.49	Ahorro en el consumo anual de refrigeración, calefacción y total (%) respecto al modelo de referencia, en edificios de 1 a 6 plantas.	Elaboración propia.
Fig. 7.50	Mapa de zonas climáticas (izq.) y zonas pluviométricas de promedios (dcha.) en España, con ubicación de las ocho ciudades escogidas.	Elaboración propia. En base a la fuente: Lerma, C. 2020.
Fig. 7.51	Consumo anual de energía final total (kWh) en el modelo de referencia y tras la rehabilitación, en los modelos A, B y C.	Elaboración propia.
Fig. 7.52	Pérdidas de calor por evapotranspiración totales medias anuales ( $W/m^2$ ) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en relación con las precipitaciones anuales (mm) de cada una de las ocho ciudades.	Elaboración propia.
Fig. 7.53	Pérdidas de calor por evapotranspiración totales medias anuales ( $W/m^2$ ) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en relación con la temperatura media anual ( $^{\circ}C$ ) de cada una de las ocho ciudades.	Elaboración propia.
Fig. 7.54	Ahorro de energía total final anual (%) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en relación con las pérdidas de calor por evapotranspiración totales medias ( $W/m^2$ ) de cada una de las ocho ciudades.	Elaboración propia.
Fig. 7.55	Ahorro de energía total final anual (%) en la cubierta ajardinada extensiva del modelo B en con la temperatura media anual ( $^{\circ}C$ ) de cada una de las ocho ciudades.	Elaboración propia.
Fig. 7.56	Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en las capas de vegetación y substrato en el modelo B, con tres intensidades de riego.	Elaboración propia.
Fig. 7.57	Pérdidas de calor por evapotranspiración ( $W/m^2$ ) en las capas de vegetación y substrato en el modelo C, con tres intensidades de riego.	Elaboración propia.
Fig. 7.58	Consumo energético (kWh) total y de los sistemas de climatización del modelo de referencia (Ref.) y de los modelos rehabilitados con los diferentes sistemas constructivos e intensidades de riego. Modelo B (sup.) y modelo C (inf.).	Elaboración propia.
Fig. 7.59	Temperatura superficial exterior ( $^{\circ}C$ ) de la cubierta en cada modelo de rehabilitación.	Elaboración propia.

**CAPÍTULO 8**

Fig. 8.1	Residencia de ancianos Arangoiti (izq.) y ampliación (dcha.).	Fuente: <a href="https://www.beldarrain.es/es/proyectos/salud/dos-unidades- psicogeriatricas-finalizado-2011">https://www.beldarrain.es/es/proyectos/salud/dos-unidades- psicogeriatricas-finalizado-2011</a> .
----------	---	---





Fig. 8.2	Sección de la residencia de ancianos Arangoiti (izq.) y ampliación (dcha.), marcando los tipos de cubierta (C1, C2 y C3) y los detalles constructivos realizados (A, B, C, D y E).	Elaboración propia.
Fig. 8.3	Punto de anclaje para EPIs de operarios de mantenimiento de la cubierta ajardinada.	Fuente: <a href="https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sistemas/fallnet-sr">https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sistemas/fallnet-sr</a> .
Fig. 8.4	Punto de anclaje central en placa de distribución de tracciones.	Fuente: <a href="https://www.fontdarquitectura.com/productos/cubiertas/otros/seguridad/779">https://www.fontdarquitectura.com/productos/cubiertas/otros/seguridad/779</a> .
Fig. 8.5	Detalle A.	Elaboración propia.
Fig. 8.6	Tarima de madera flotante exterior sobre plots regulables en altura.	Fuente: <a href="https://www.suimco.es/tarimas-soportes-pavimento-flotante/">https://www.suimco.es/tarimas-soportes-pavimento-flotante/</a> .
Fig. 8.7	Detalle B.	Elaboración propia.
Fig. 8.8	Montaje de la barandilla lastrada.	Fuente: <a href="https://www.bausicherheit-online.de/d/zinco-arbeitsschutzgelaender-fuer-sicheres-arbeiten-auf-dem-dach/">https://www.bausicherheit-online.de/d/zinco-arbeitsschutzgelaender-fuer-sicheres-arbeiten-auf-dem-dach/</a> .
Fig. 8.9	Montaje de la barandilla lastrada con ángulo de 67,5°.	Fuente: <a href="https://www.bausicherheit-online.de/d/zinco-arbeitsschutzgelaender-fuer-sicheres-arbeiten-auf-dem-dach/">https://www.bausicherheit-online.de/d/zinco-arbeitsschutzgelaender-fuer-sicheres-arbeiten-auf-dem-dach/</a> .
Fig. 8.10	Detalle C.	Elaboración propia.
Fig. 8.11	Detalle C con instalación de riego por capilaridad.	Elaboración propia.
Fig. 8.12	Detalle D.	Elaboración propia.
Fig. 8.13	Detalle E con detalle de la resolución del goterón en el sistema SATE.	Elaboración propia.
Fig. 8.14	Panel de EPS nodular como elemento de agarre en cubiertas inclinadas.	Fuente: <a href="https://zinco-greenroof.co.uk/press-releases?page=4">https://zinco-greenroof.co.uk/press-releases?page=4</a> .
Fig. 8.15	Resolución del alero con perfil metálico perforado con puntos de anclaje.	Fuente: <a href="https://slideplayer.es/slide/1107113/">https://slideplayer.es/slide/1107113/</a> .
<b>ANEXO I</b>		
Fig. I.1	Sistema constructivo y breve descripción de los 16 modelos a estudiar.	Elaboración propia.
<b>ANEXO III</b>		
Fig. III.1	Detalle constructivo de cubierta convencional.	Elaboración propia. En base a la fuente: IVE. 2011
Fig. III.2	Detalle constructivo de forjado interior.	Elaboración propia. En base a la fuente: IVE. 2011
Fig. III.3	Detalle constructivo de fachada (izq.), de medianera (centro) y de particiones interiores (dcha.).	Elaboración propia. En base a la fuente: IVE. 2011
Fig. III.4	Detalle constructivo de solera.	Elaboración propia. En base a la fuente: IVE. 2011
Fig. III.5	Detalle constructivo de cubierta del modelo A tras rehabilitación.	Elaboración propia.



Fig. III.6	Detalle constructivo de cubierta del modelo B tras rehabilitación.	Elaboración propia.
Fig. III.7	Detalle constructivo de cubierta del modelo C tras rehabilitación.	Elaboración propia.
<b>ANEXO IV</b>		
Fig. IV.1	Horas pasadas en cada rango de temperatura durante el año simulado y temperatura media anual (°F), para cada zona térmica. Tabla redibujada 7.29.	Elaboración propia.



## R.2 TABLAS

A continuación, se detalla la información de las distintas tablas que aparecen en la tesis, organizadas por capítulos. Al igual que en el caso de las figuras, se indica la descripción, el autor y la procedencia de cada tabla.

CAPÍTULO 2		
Tabla 2.1	Respuesta térmica en el cuerpo humano.	Elaboración propia. Fuente: Ramírez, J.D.M. 2019.
Tabla 2.2	Ejemplos de condiciones de confort de espacios construidos, en función de las categorías de ambiente térmico.	Elaboración propia. Fuente: AENOR. 2006.
Tabla 2.3	Servicios prestados por la Infraestructura Verde.	Elaboración propia. Fuente: Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.
Tabla 2.4	Posibles elementos de la Infraestructura Verde y funciones.	Elaboración propia. Fuente: Grupo de Trabajo de Conama 2014. 2014.
Tabla 2.5	Principales motivos para la aplicación de cubiertas ajardinadas en 25 ciudades mundiales.	Elaboración propia. Fuente: Sutton, R.K. 2015.
Tabla 2.6	Límite de consumo de energía primaria total (kWh/m <sup>2</sup> año) en edificios de uso residencial.	Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 2.7	Límite de consumo de energía primaria no renovable (kWh/m <sup>2</sup> año) en edificios de uso residencial.	Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 2.8	Límite de permeabilidad al aire (m <sup>3</sup> /hm <sup>2</sup> ) de los huecos de la envolvente.	Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 2.9	Valor límite de la relación del cambio de aire con una presión de 50 Pa, n <sub>50</sub> .	Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 2.10	Transmitancia térmica máxima de los elementos de la envolvente térmica (W/m <sup>2</sup> K), según la sección 1 del DB-HE.	Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 2.11	Transmitancia térmica máxima de los elementos de la envolvente térmica (W/m <sup>2</sup> K), según el anejo E del DB-HE.	Elaboración propia. Fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
CAPÍTULO 3		
Tabla 3.1	Valores aproximados de cargas distribuidas para cubiertas, con capacidad máxima de agua almacenada (kg/m <sup>2</sup> ).	Elaboración propia. En base a las fuentes: Ajuntament de Barcelona. 2015; Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Ministerio de Fomento. 2009; Zimmermann, A. 2015.



## CAPÍTULO 4

		Elaboración propia. En base a la fuente: IVE. 2011. Imágenes: elaboración propia, excepto la fibra de coco (Fuente: <a href="https://materials.soa.utexas.edu/search/materials/details/t/product/id/5503">https://materials.soa.utexas.edu/search/materials/details/t/product/id/5503</a> )
Tabla 4.1	Tipos de materiales aislantes y propiedades.	
Tabla 4.2	Resistencia mínima a la compresión para materiales aislantes en cubiertas planas convencionales (kPa).	Elaboración propia. Fuente: Paradela, M.L.S. 2020a.
Tabla 4.3	Diferentes sistemas drenantes en función de la sucesión de capas de las cubiertas ajardinadas.	Elaboración propia. Fuente: AENOR. 2009.
Tabla 4.4	Composición de los productos empleados para los sistemas drenantes.	Elaboración propia. En base a la fuente: AENOR. 2009.
Tabla 4.5	Valores orientativos de contenido de materia orgánica (gr/L).	Elaboración propia. Fuente: FLL. 2018.
Tabla 4.6	Contenido límite de limos y arcillas (% en masa) en el sustrato de cubiertas ajardinadas.	Elaboración propia. Fuente: FLL. 2018.
Tabla 4.7	WHC del sustrato (% en volumen).	Elaboración propia. Fuente: FLL. 2018.
Tabla 4.8	Permeabilidad al agua del sustrato (en mm/min).	Elaboración propia. Fuente: FLL. 2018.
Tabla 4.9	Espesor de la capa de sustrato (cm) en función de la especie vegetal.	Elaboración propia. En base a las fuentes: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Zimmermann, A. 2015.
Tabla 4.10	Designación y función de los diferentes tipos de capas separadoras.	Elaboración propia. En base a las fuentes: AENOR. 2009; Ministerio de Fomento. 2022b; Paradela, M.L.S. 2020a.
Tabla 4.11	Productos de las diferentes capas separadoras.	Elaboración propia. En base a las fuentes: AENOR. 2009; Ministerio de Fomento. 2003; Paradela, M.L.S. 2020a; ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021a.
Tabla 4.12	Composición de los productos empleados para las diferentes capas separadoras.	Elaboración propia. En base a las fuentes: AENOR. 2009; Ministerio de Fomento. 2003; Paradela, M.L.S. 2020a; ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021a.
Tabla 4.13	Particularidades de las capas separadoras CS-1 y CS-5 en cubiertas ajardinadas.	Elaboración propia. En base a las fuentes: AENOR. 2009; 2013a; ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021a.



Tabla 4.14	Valores orientativos del coeficiente de escurrentía.	Elaboración propia. Fuente: FLL. 2018.
Tabla 4.15	Especies vegetales aptas para cubiertas extensivas y semiintensivas en la costa mediterránea española.	Elaboración propia. En base a la fuente: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.
Tabla 4.16	Fases del mantenimiento.	Elaboración propia. En base a las fuentes: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; Zimmermann, A. 2015.
<b>CAPÍTULO 5</b>		
Tabla 5.1	Comparativa de diferentes tipos de cubiertas ajardinadas.	Elaboración propia. En base a la fuente: Ajuntament de Barcelona. 2015.
Tabla 5.2	Posibles combinaciones de diferentes tipos de cubiertas ajardinadas.	Elaboración propia. En base a la fuente: Ajuntament de Barcelona. 2015.
<b>CAPÍTULO 6</b>		
Tabla 6.1	Modelos ordenados por puntuación total, suma de la puntuación relativa a la carga de peso propio y al coste de construcción (Véase Anexo I).	Elaboración propia.
Tabla 6.2	Principales características del modelo de referencia: espesor (e), resistencia (R), transmitancia (U), carga de peso propio (P) y coste de construcción (C) (Véase Anexo I).	Elaboración propia.
Tabla 6.3	Principales características del modelo 1: espesor (e), resistencia (R), transmitancia (U), carga de peso propio (P) y coste de construcción (C) (Véase Anexo I).	Elaboración propia.
Tabla 6.4	Principales características del modelo 4: espesor (e), resistencia (R), transmitancia (U), carga de peso propio (P) y coste de construcción (C) (Véase Anexo I).	Elaboración propia.
Tabla 6.5	Tipo de materiales aislantes térmicos y su uso en cubiertas planas no ventiladas.	Elaboración propia. En base a la fuente: IVE. 2011.
Tabla 6.6	Requisitos del material aislante térmico en cubiertas planas invertidas.	Elaboración propia. Fuente: AENOR, 2013a.
Tabla 6.7	Propiedades del sustrato: valores recomendados y características de los sustratos empleados en los modelos.	Elaboración propia. Datos de las fuentes: Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012; ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021d; 2021e.
Tabla 6.8	Características del <i>Sedum album</i> .	Elaboración propia.
Tabla 6.9	Características del <i>Sedum spurium</i> .	Elaboración propia.
Tabla 6.10	Características del <i>Sedum spurium var. coccineum</i> .	Elaboración propia.
Tabla 6.11	Características de la <i>Armeria marítima</i> .	Elaboración propia.
Tabla 6.12	Características de la <i>Santolina chamaecyparissus</i> .	Elaboración propia.
Tabla 6.13	Características del <i>Thymus vulgaris</i> .	Elaboración propia.
Tabla 6.14	Materialidad y nombre comercial de las diferentes capas empleadas en los modelos A, B y C.	Elaboración propia.
Tabla 6.15	Orden y secuencia de ejecución de las capas de las maquetas de cubierta de los modelos A, B y C.	Elaboración propia.



Tabla 6.16	Principales características del <i>data-logger</i> TH1165.	Elaboración propia. Fuente: Lerma, C., Borràs, J.G., Mas, Á., <i>et al.</i> 2021.
CAPÍTULO 7		
Tabla 7.1	Transmitancia térmica ( $U=W/m^2K$ ) de los elementos de la envolvente térmica del modelo de referencia y límite de transmitancia térmica establecido por el DB-HE.	Elaboración propia. Datos de la fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 7.2	Resumen de cargas internas en la vivienda modelada: ocupación (número de personas), iluminación (W), equipos eléctricos (W), zonas térmicas y ventilación natural (ACH).	Elaboración propia.
Tabla 7.3	Principales datos necesarios para el modelado del acabado de los sistemas constructivos de las cubiertas de los modelos A, B y C.	Elaboración propia. Datos de la fuente: Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., <i>et al.</i> 2013; Kazemi, M., Courard, L. 2022; Ministerio de Vivienda. 2010; Muñoz, V.B. 2016; Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., <i>et al.</i> 2022; ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021d; 2021e.
Tabla 7.4	Temperatura media anual por horas (°C) para cada ciudad.	Elaboración propia.
Tabla 7.5	Radiación solar media anual por horas ( $W/m^2$ ) para cada ciudad.	Elaboración propia.
Tabla 7.6	Transmitancia térmica ( $U=W/m^2K$ ) de los elementos de la envolvente en el modelo de referencia (sin aislamiento) y el límite establecido por normativa para las diferentes zonas climáticas.	Elaboración propia. Datos de la fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 7.7	Ahorro energético (kWh) en relación con el consumo de energía final total anual del modelo de referencia, para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).	Elaboración propia.
Tabla 7.8	Área total (parte opaca + huecos), área de huecos ( $m^2$ ) y proporción de huecos (%) de las diferentes fachadas.	Elaboración propia.
Tabla 7.9	Porcentaje (%) de ahorro energético respecto al consumo de energía final anual del modelo de referencia para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.). En cada caso, se determina la influencia (Inf.) (%) respecto a toda la envolvente.	Elaboración propia.
Tabla 7.10	Ahorro económico (€) en relación con el consumo de energía final total anual del modelo de referencia, para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente (Env.) y solo cubierta (Cub.).	Elaboración propia.
Tabla 7.11	Temperatura media anual por horas (°C) de València.	Elaboración propia.
Tabla 7.12	Radiación solar global media anual por horas ( $W/m^2$ ) de València.	Elaboración propia.
Tabla 7.13	Transmitancia térmica ( $U=W/m^2K$ ) del modelo de referencia y modelos A, B y C, obtenidas por las simulaciones energéticas y de forma manual en el Anexo I.	Elaboración propia.



Tabla 7.14	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia y los modelos A, B y C, propuestos para rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla 7.15	Consumo energético medio anual (kWh/año) por tipos de vivienda y zonas climáticas en España.	Elaboración propia. Fuente: IDAE. 2011.
Tabla 7.16	Consumo de refrigeración anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).	Elaboración propia.
Tabla 7.17	Consumo de calefacción anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).	Elaboración propia.
Tabla 7.18	Consumo total anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).	Elaboración propia.
Tabla 7.19	Porcentaje (%) representado por cada tipo de consumo sobre el consumo energético final anual en los modelos de referencia, A, B y C tras rehabilitar solo la cubierta.	Elaboración propia.
Tabla 7.20	Consumo anual de energía final y primaria total (kWh/año), y consumo anual de energía primaria total por m <sup>2</sup> (kWh/m <sup>2</sup> año).	Elaboración propia.
Tabla 7.21	Consumo anual de energía final y primaria renovable (kWh/año), y consumo anual de energía primaria renovable por m <sup>2</sup> (kWh/m <sup>2</sup> año).	Elaboración propia.
Tabla 7.22	Consumo anual de energía final (kWh/año) y emisiones de CO <sub>2</sub> anuales producidas por el edificio de acuerdo con este consumo (kg CO <sub>2</sub> ).	Elaboración propia.
Tabla 7.23	Transmitancia térmica (U=W/m <sup>2</sup> K) de los diferentes elementos de la envolvente térmica: valor límite por normativa, transmitancia del modelo de referencia y transmitancia en los modelos rehabilitados.	Elaboración propia. Datos de la fuente: Ministerio de Fomento. 2022a.
Tabla 7.24	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia y los modelos A, B y C, propuestos para rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla 7.25	Comparación de los consumos energéticos anuales (kWh/año) totales, de refrigeración y de calefacción del modelo de referencia y los modelos A, B y C, tanto para la rehabilitación solo con cubierta como para toda la envolvente.	Elaboración propia.
Tabla 7.26	Consumo energético medio (kWh/año) por tipos de vivienda y zonas climáticas en España.	Elaboración propia. Fuente: IDAE. 2011.
Tabla 7.27	Consumo de calefacción anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).	Elaboración propia.
Tabla 7.28	Tabla resumen de las diferentes zonas térmicas.	Elaboración propia.
Tabla 7.29	Horas pasadas en cada rango de temperatura durante el año simulado y temperatura media anual (°C), para cada zona térmica (Tabla original obtenida del programa en el Anexo IV).	Elaboración propia.
Tabla 7.30	Consumo de refrigeración anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).	Elaboración propia.
Tabla 7.31	Consumo total anual (kWh/año) para cada modelo y porcentajes de ahorro energético (%).	Elaboración propia.



Tabla 7.32	Porcentaje (%) representado por cada tipo de consumo sobre el consumo energético final anual en los modelos de referencia, A, B y C tras rehabilitar toda la envolvente.	Elaboración propia.
Tabla 7.33	Consumo anual de energía final y primaria tota (kWh/año), y consumo anual de energía primaria total por m <sup>2</sup> (kWh/m <sup>2</sup> año).	Elaboración propia.
Tabla 7.34	Consumo anual de energía final y primaria renovable (kWh/año), y consumo anual de energía primaria renovable por m <sup>2</sup> (kWh/m <sup>2</sup> año).	Elaboración propia.
Tabla 7.35	Consumo anual de energía final (kWh/año) y emisiones de CO <sub>2</sub> anuales producidas por el edificio de acuerdo con este consumo (kg CO <sub>2</sub> ).	Elaboración propia.
Tabla 7.36	Consumo total anual (kWh/año) para cada modelo, coste económico anual en electricidad y ahorro económico (€).	Elaboración propia.
Tabla 7.37	Porcentaje (%) de ahorro energético respecto al consumo de energía final anual del modelo de referencia para cada sistema de cubierta (A-B-C) y en los dos casos de rehabilitación: toda la envolvente y solo cubierta. En cada caso, se determina la influencia (%) de la cubierta en cada sistema constructivo (A-B-C) respecto a toda la envolvente.	Elaboración propia.
Tabla 7.38	Coste de construcción (€) y peso propio (daN) para toda la superficie de la cubierta en los modelos B y C, junto al coste económico anual en electricidad (€) y al ahorro anual en energía final respecto al modelo de referencia (kWh/año).	Elaboración propia.
Tabla 7.39	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 1 planta.	Elaboración propia.
Tabla 7.40	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 2 plantas.	Elaboración propia.
Tabla 7.41	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 3 plantas.	Elaboración propia.
Tabla 7.42	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 4 plantas.	Elaboración propia.
Tabla 7.43	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 5 plantas.	Elaboración propia.
Tabla 7.44	Consumo energético anual (kWh/año) del modelo de referencia, el modelo B tras rehabilitación de la cubierta y ahorro respecto al modelo de referencia (%) para un edificio de 6 plantas.	Elaboración propia.
Tabla 7.45	Temperatura media anual por horas (°C) para cada ciudad.	Elaboración propia.





Tabla 7.46	Radiación solar media anual por horas ( $W/m^2$ ) para cada ciudad.	Elaboración propia.
Tabla 7.47	Zona climática y pluviométrica de promedios de cada una de las ciudades. Espesor de la capa de material aislante (cm) de la cubierta en los modelos A, B y C.	Elaboración propia.
Tabla 7.48	Consumo energético medio (kWh/año) de una vivienda unifamiliar en función de las zonas climáticas en España y consumo energético medio anual (kWh/año) del modelo de referencia en cada una de las ocho ciudades.	Elaboración propia. Datos de la fuente: IDAE. 2011.
Tabla 7.49	Ahorro energético (%) en comparación con el modelo de referencia.	Elaboración propia.

**ANEXO I**

Tabla I.1	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo de referencia.	Elaboración propia.
Tabla I.2	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 1.	Elaboración propia.
Tabla I.3	Características de las diferentes capas del sistema constructivo de los modelos 2 y 3.	Elaboración propia.
Tabla I.4	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 4.	Elaboración propia.
Tabla I.5	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 5.	Elaboración propia.
Tabla I.6	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 6.	Elaboración propia.
Tabla I.7	Características de las diferentes capas del sistema constructivo de los modelos 7 y 8.	Elaboración propia.
Tabla I.8	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 9.	Elaboración propia.
Tabla I.9	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 10.	Elaboración propia.
Tabla I.10	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 11.	Elaboración propia.
Tabla I.11	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 12.	Elaboración propia.
Tabla I.12	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 13.	Elaboración propia.
Tabla I.13	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 14.	Elaboración propia.
Tabla I.14	Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 15.	Elaboración propia.
Tabla I.15	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo de referencia.	Elaboración propia.
Tabla I.16	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 1.	Elaboración propia.
Tabla I.17	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 2.	Elaboración propia.
Tabla I.18	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 3.	Elaboración propia.
Tabla I.19	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 4.	Elaboración propia.
Tabla I.20	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 5.	Elaboración propia.



Tabla I.21	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 6.	Elaboración propia.
Tabla I.22	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 7.	Elaboración propia.
Tabla I.23	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 8.	Elaboración propia.
Tabla I.24	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 9.	Elaboración propia.
Tabla I.25	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 10.	Elaboración propia.
Tabla I.26	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 11.	Elaboración propia.
Tabla I.27	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 12.	Elaboración propia.
Tabla I.28	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 13.	Elaboración propia.
Tabla I.29	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 14.	Elaboración propia.
Tabla I.30	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 15.	Elaboración propia.
Tabla I.31	Cálculo de la carga de peso propio del modelo de referencia.	Elaboración propia.
Tabla I.32	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 1.	Elaboración propia.
Tabla I.33	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 2.	Elaboración propia.
Tabla I.34	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 3.	Elaboración propia.
Tabla I.35	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 4.	Elaboración propia.
Tabla I.36	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 5.	Elaboración propia.
Tabla I.37	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 6.	Elaboración propia.
Tabla I.38	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 7.	Elaboración propia.
Tabla I.39	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 8.	Elaboración propia.
Tabla I.40	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 9.	Elaboración propia.
Tabla I.41	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 10.	Elaboración propia.
Tabla I.42	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 11.	Elaboración propia.
Tabla I.43	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 12.	Elaboración propia.
Tabla I.44	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 13.	Elaboración propia.
Tabla I.45	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 14.	Elaboración propia.
Tabla I.46	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 15.	Elaboración propia.
Tabla I.47	Cálculo del coste de construcción del modelo de referencia.	Elaboración propia.
Tabla I.48	Cálculo del coste de construcción del modelo 1.	Elaboración propia.
Tabla I.49	Cálculo del coste de construcción del modelo 2.	Elaboración propia.
Tabla I.50	Cálculo del coste de construcción del modelo 3.	Elaboración propia.
Tabla I.51	Cálculo del coste de construcción del modelo 4.	Elaboración propia.
Tabla I.52	Cálculo del coste de construcción del modelo 5.	Elaboración propia.
Tabla I.53	Cálculo del coste de construcción del modelo 6.	Elaboración propia.
Tabla I.54	Cálculo del coste de construcción del modelo 7.	Elaboración propia.
Tabla I.55	Cálculo del coste de construcción del modelo 8.	Elaboración propia.
Tabla I.56	Cálculo del coste de construcción del modelo 9.	Elaboración propia.
Tabla I.25	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 10.	Elaboración propia.
Tabla I.26	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 11.	Elaboración propia.
Tabla I.27	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 12.	Elaboración propia.
Tabla I.28	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 13.	Elaboración propia.
Tabla I.29	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 14.	Elaboración propia.
Tabla I.30	Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 15.	Elaboración propia.
Tabla I.31	Cálculo de la carga de peso propio del modelo de referencia.	Elaboración propia.



Tabla I.32	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 1.	Elaboración propia.
Tabla I.33	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 2.	Elaboración propia.
Tabla I.34	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 3.	Elaboración propia.
Tabla I.35	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 4.	Elaboración propia.
Tabla I.36	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 5.	Elaboración propia.
Tabla I.37	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 6.	Elaboración propia.
Tabla I.38	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 7.	Elaboración propia.
Tabla I.39	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 8.	Elaboración propia.
Tabla I.40	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 9.	Elaboración propia.
Tabla I.41	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 10.	Elaboración propia.
Tabla I.42	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 11.	Elaboración propia.
Tabla I.43	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 12.	Elaboración propia.
Tabla I.44	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 13.	Elaboración propia.
Tabla I.45	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 14.	Elaboración propia.
Tabla I.46	Cálculo de la carga de peso propio del modelo 15.	Elaboración propia.
Tabla I.47	Cálculo del coste de construcción del modelo de referencia.	Elaboración propia.
Tabla I.48	Cálculo del coste de construcción del modelo 1.	Elaboración propia.
Tabla I.49	Cálculo del coste de construcción del modelo 2.	Elaboración propia.
Tabla I.50	Cálculo del coste de construcción del modelo 3.	Elaboración propia.
Tabla I.51	Cálculo del coste de construcción del modelo 4.	Elaboración propia.
Tabla I.52	Cálculo del coste de construcción del modelo 5.	Elaboración propia.
Tabla I.53	Cálculo del coste de construcción del modelo 6.	Elaboración propia.
Tabla I.54	Cálculo del coste de construcción del modelo 7.	Elaboración propia.
Tabla I.55	Cálculo del coste de construcción del modelo 8.	Elaboración propia.
Tabla I.56	Cálculo del coste de construcción del modelo 9.	Elaboración propia.
Tabla I.57	Cálculo del coste de construcción del modelo 10.	Elaboración propia.
Tabla I.58	Cálculo del coste de construcción del modelo 11.	Elaboración propia.
Tabla I.59	Cálculo del coste de construcción del modelo 12.	Elaboración propia.
Tabla I.60	Cálculo del coste de construcción del modelo 13.	Elaboración propia.
Tabla I.61	Cálculo del coste de construcción del modelo 14.	Elaboración propia.
Tabla I.62	Cálculo del coste de construcción del modelo 15.	Elaboración propia.

**ANEXO II**

Tabla II.1	Temperatura mensual media (°C) desde 2001 hasta 2022, incluido el año de estudio de las maquetas.	Elaboración propia.
Tabla II.2	Temperatura mensual media (°C) para el periodo de 2001 a 2022, desviación estándar, límites inferiores y superiores del rango según el teorema de Chebychev con $k=1,5$ y temperatura media mensual durante el año de estudio de las maquetas.	Elaboración propia.
Tabla II.3	Humedad relativa mensual media (%) desde 2010 hasta 2022, incluido el año de estudio de las maquetas.	Elaboración propia.



Tabla II.4	Humedad relativa mensual media (%) para el periodo de 2010 a 2022, desviación estándar, límites inferiores y superiores del rango según el teorema de Chebychev con $k=2$ y humedad relativa media mensual durante el año de estudio de las maquetas.	Elaboración propia.
Tabla II.5	Precipitaciones totales mensuales y anuales (mm) desde 2010 hasta 2022, incluido el año de estudio de las maquetas.	Elaboración propia.
Tabla II.6	Precipitaciones totales medias (mm) para el periodo de 2010 a 2022, desviación estándar, límites inferiores y superiores del rango según el teorema de Chebychev con $k=2$ y precipitaciones totales durante el año de estudio de las maquetas.	Elaboración propia.
<b>ANEXO III</b>		
Tabla III.1	Horario de precipitaciones, por día y en metros/hora.	Elaboración propia.
Tabla III.2	Horarios de ocupación, iluminación y equipos eléctricos para cada estancia.	Elaboración propia.
Tabla III.3	Tipo y nivel de actividad asociado a cada estancia.	Elaboración propia.
Tabla III.4	Horarios de refrigeración y calefacción en función de la temperatura de consigna.	Elaboración propia.
Tabla III.5	Sistema constructivo de cubierta convencional.	Elaboración propia.
Tabla III.6	Sistema constructivo de forjado interior.	Elaboración propia.
Tabla III.7	Sistema constructivo de fachada.	Elaboración propia.
Tabla III.8	Sistema constructivo de medianera.	Elaboración propia.
Tabla III.9	Sistema constructivo de medianera con zonas comunes.	Elaboración propia.
Tabla III.10	Sistema constructivo de particiones interiores.	Elaboración propia.
Tabla III.11	Sistema constructivo de solera.	Elaboración propia.
Tabla III.12	Solución constructiva para puerta de acceso y ventanas.	Elaboración propia.
Tabla III.13	Propiedades de los materiales empleados para la formación de los sistemas constructivos.	Elaboración propia.
Tabla III.14	Propiedades de los materiales empleados como cámara de aire.	Elaboración propia.
Tabla III.15	Propiedades de los materiales empleados para acristalamiento de ventanas.	Elaboración propia.
Tabla III.16	Propiedades de los materiales empleados para marco de ventanas.	Elaboración propia.
Tabla III.17	Número máximo de personas simultáneamente en cada estancia.	Elaboración propia.
Tabla III.18	Potencia total de iluminación instalada en cada estancia (W).	Elaboración propia.
Tabla III.19	Potencia total de equipos eléctricos instalados en cada estancia (W).	Elaboración propia.
Tabla III.20	Tipos de espacio relacionados con las estancias de la vivienda y filtraciones de aire (ACH).	Elaboración propia.
Tabla III.21	Obtención de la ventilación natural para cada estancia (ACH).	Elaboración propia.
Tabla III.22	Tipos de espacios y ventilación asociados a cada zona térmica.	Elaboración propia.



Tabla III.23	Sistema constructivo de cubierta del modelo A tras rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla III.24	Sistema constructivo de cubierta del modelo B tras rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla III.25	Sistema constructivo de cubierta del modelo C tras rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla III.26	Transmitancias térmicas límite ( $W/m^2K$ ) de los elementos de la envolvente a rehabilitar.	Elaboración propia.
Tabla III.27	Propiedades de los materiales empleados para la formación de los sistemas constructivos en rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla III.28	Propiedades de los materiales empleados para acristalamiento de ventanas en rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla III.29	Propiedades de los materiales empleados para marco de ventanas en rehabilitación.	Elaboración propia.
Tabla III.30	Propiedades de los materiales empleados para para vegetación en cubiertas.	Elaboración propia.
Tabla III.31	Tipos de espacio relacionados con las estancias de la vivienda y filtraciones de aire (ACH) en rehabilitación.	Elaboración propia.



### R.3. BIBLIOGRAFÍA

Por último, en este apartado se detallan en una lista los autores y obras que se han consultado para la realización de esta tesis.

#### ABC Comunidad Valenciana.

2010. Valencia instala jardines verticales y cubiertas verdes en los edificios municipales. *ABC*. [https://www.abc.es/espana/comunidad-valenciana/abci-valencia-instala-jardines-verticales-y-cubiertas-verdes-edificios-municipales-201004200300-14072834433\\_noticia.html](https://www.abc.es/espana/comunidad-valenciana/abci-valencia-instala-jardines-verticales-y-cubiertas-verdes-edificios-municipales-201004200300-14072834433_noticia.html). Acceso: 08/05/2020.

#### Afasia archzine.

2021. big - Westbank's Energy Hub - San José. <https://afasiaarchzine.com/2021/04/big-westbanks-energy-hub-san-jose/>. Acceso: 27/05/2021.

#### Agencia estatal de Meteorología (AEMET).

2022. Estadísticas de las variables meteorofenológicas. [https://www.aemet.es/ca/datos\\_abiertos/estadisticas/estadistica\\_meteorofenologicas](https://www.aemet.es/ca/datos_abiertos/estadisticas/estadistica_meteorofenologicas). Acceso: 04/10/2022.

#### Ajuntament de Barcelona.

2015. Guia de terrats vius i coberts verdes. <http://hdl.handle.net/11703/86542>. Acceso: 28/12/2022.

2022. Plan de impulso a la infraestructura verde. <https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/es/que-hacemos-y-porque-verde-urbano-y-biodiversidad/plan-infraestructura-verde>. Acceso: 02/06/2020.

#### Ajuntament de Gandia.

2022. Expedient 36232/2021, PP-924 92a Modificació de l'ordenació detallada del Pla General, Cobertes i terrats verds. [https://www.gandia.es/aytg/Web\\_php/txt/d8ff523f8120d0bfcea09b7b66188adafb53c0c8f1ccb1d62c0a9483f6694f9f.pdf](https://www.gandia.es/aytg/Web_php/txt/d8ff523f8120d0bfcea09b7b66188adafb53c0c8f1ccb1d62c0a9483f6694f9f.pdf). Acceso: 28/12/2022.

#### Akbari, H., Pomerantz, M., Taha, H.

2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00089-X.

#### Alexandri, E., Jones, P.

2008. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and Environment*, 43(4), 480-493. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.10.055.

#### Alliance for Sustainable Energy, LLC.

2022. OpenStudio. <https://openstudio.net/>. Acceso: 09/03/2022.

#### Álvarez, R.J.

2019. Jardines en el tejado de las favelas de Brasil. *El Mundo*. <https://www.elmundo.es/internacional/2019/12/15/5df52be8fd-dffbf0e8b458c.html>. Acceso: 28/12/2022.

#### Al-Zubaydi, A.Y.T.

2013. Building models design and energy simulation with google Sketchup and Openstudio. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 3(4), 318-333.

#### Arcenegui, V.

2011. El fuego sobre el suelo. *Mètode*, 70. <https://metode.es/revistas-metode/monograficos/el-foc-sobre-el-sol.html>. Acceso: 28/12/2022.

#### Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., Turni, G., Vanoli, G.P.

2013. Green roofs in European climates. Are effective solutions for the energy savings in air-conditioning? *Applied Energy*, 104, 845-859. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.11.068.

**Asociación Española de Normalización (UNE).**

2017. UNE-EN 12207: Ventanas y puertas. Permeabilidad al aire. Clasificación.

**Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR).**

2002. UNE-EN ISO 7726. Ergonomía de los ambientes térmicos. Instrumentos de medida de las magnitudes físicas.

2006. UNE-EN ISO 7730: Ergonomía del ambiente térmico. Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local.

2009. UNE 104416. Materiales sintéticos. Sistemas de impermeabilización de cubiertas realizados con membranas impermeabilizantes formadas con láminas sintéticas flexibles. Instrucciones, control, utilización y mantenimiento.

2011. UNE-EN 15758. Conservación del patrimonio cultural. Procedimientos e instrumentos para la medición de las temperaturas del aire y de las superficies de los objetos.

2012. UNE-EN 15643-1: Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 1: Marco general.

2013a. UNE 104401. Impermeabilización en la edificación sobre y bajo rasante con láminas bituminosas modificadas. Sistemas y puesta en obra.

2013b. UNE-EN 826. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación del comportamiento a compresión.

2013c. UNE-EN 13956. Láminas flexibles para impermeabilización. Láminas plásticas y de caucho para impermeabilización de cubiertas. Definiciones y características.

2013d. UNE-EN 1605. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la deformación bajo condiciones específicas de carga de compresión y temperatura.

2013e. UNE-EN 12087. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la absorción de agua a largo plazo por inmersión.

2013f. UNE-EN 12088. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la absorción de agua a largo plazo por difusión.

2013g. UNE-EN 12091. Productos aislantes térmicos para aplicaciones en la edificación. Determinación de la resistencia a ciclos de congelación y descongelación.

**Associació Flora Catalana.**

2018. [Búsqueda de diferentes especies de plantas]. <https://floracatalana.cat/drupal843/node>. Acceso: 11/06/2020.

**Atelier Groenblauw.**

2022. Retention roof. <https://www.urbangreenbluegrids.com/measures/green-roofs/extensive-green-roofs/retention-roof/>. Acceso: 30/04/2020.

**Ayuntamiento de Vitoria-Gasteiz.**

2022. Anillo Verde de Vitoria-Gasteiz. [https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=u\\_1e8934a8\\_12e47a4954c\\_\\_7ffd](https://www.vitoria-gasteiz.org/wb021/was/contenidoAction.do?idioma=es&uid=u_1e8934a8_12e47a4954c__7ffd). Acceso: 22/07/2020.

**BajatelaPontencia.org.**

2013. Calcula cuánta potencia realmente necesitas. <http://www.bajatelapontencia.org/la-potencia-que-necesitas/>. Acceso: 29/06/2022.

**Banting, D., Doshi, H., Li, J., Missios, P.**

2005. Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto. Informe para City of Toronto y Ontario Centres for Excellence - Earth and Environmental Technologies (OCE-ETech).

**Barcelona LED Iluminación.**

2022a. Downlight LED circular empotrable 6 W Corte Ø 70mm.

2022b. Downlight LED circular empotrable 20 W Corte Ø 190mm.

**Barmpareos, N., Assimakopoulos, M.N., Assimakopoulos, V.D., Loumos, N., Sotiriou, M.A., Koukoumtzis, A.**

2018. Indoor air quality and thermal conditions in a primary school with a green roof system. *Atmosphere*, 9(2), 75. DOI: 10.3390/atmos9020075.



**Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L.B., D'Amico, F.**

2017. An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal Processing*, 132, 201-209. DOI: 10.1016/j.sigpro.2016.05.016.

**Bengtsson, L.**

2005. Peak flows from thin sedum-moss roof. *Nordic Hydrology*, 36(3), 269-280. DOI: 10.2166/nh.2005.0020.

**Benvenuti, S.**

2014. Wildflower green roofs for urban landscaping, ecological sustainability and biodiversity. *Landscape and Urban Planning*, 124, 151-161. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2014.01.004.

**Berardi, U.**

2012. Sustainability assessment in the construction sector: Rating systems and rated buildings. *Sustainable Development*, 20(6), 411-424. DOI: 10.1002/sd.532.

2016. The outdoor microclimate benefits and energy saving resulting from green roofs retrofits. *Energy and Buildings*, 121, 217-229. DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.03.021.

**Berardi, U., GhaffarianHoseini, AH., GhaffarianHoseini, A.**

2014. State-of-the-art analysis of the environmental benefits of green roofs. *Applied Energy*, 115, 411-428. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.10.047.

**Berndtsson, J.C.**

2010. Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review. *Ecological Engineering*, 36(4), 351-360. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2009.12.014.

**Berndtsson, J.C., Bengtsson, L. Jinno, K.**

2008. First flush effect from vegetated roofs during simulated rain events. *Hydrology Research*, 39(3), 171-179. DOI: 10.2166/nh.2008.044.

2009. Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs. *Ecological Engineering*, 35(3), 369-380. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.09.020.

**Berndtsson, J.C., Emilsson, T., Bengtsson, L.**

2006. The influence of extensive vegetated roofs on runoff water quality. *Science of the Total Environment*, 355(1-3), 48-63. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2005.02.035.

**Berretta, C., Poë, S., Stovin, V.**

2014. Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics. *Journal of Hydrology*, 511, 374-386. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.01.036.

**Bevilacqua, P., Bruno, R., Arcuri, N.**

2020. Green roofs in a Mediterranean climate: energy performances based on in-situ experimental data. *Renewable Energy*, 152, 1414-1430. DOI: 10.1016/j.renene.2020.01.085.

**Bianchini, F., Hewage, K.**

2012. How "green" are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, 57-65. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.08.019.

**Big Ladder software.**

2022. Input Output Reference. <https://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-1/input-output-reference/index.html>. Acceso: 28/06/2022.

**Blanusa, T., Monteiro, M.M.V., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., Cameron, R.W.F.**

2013. Alternatives to *Sedum* on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better 'cooling service'? *Building and Environment*, 59, 99-106. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.08.011.

**BOERI Stefano Boeri Architetti.**

2022. Vertical Forest. <https://www.stefanoboeriarchitetti.net/en/project/vertical-forest/>. Acceso: 05/07/2021.



**Bofill, N.C.**

2017. Modelización energética de edificios con herramienta de simulación dinámica. Trabajo final de Grado. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Borràs, J.G., Lerma, C., Mas, Á., Vercher, J., Gil, E.**

2021. Economic study of green roofs as a sustainable construction system. Publicación en la 5th International Scientific Conference on Economics and Management (EMAN 2021), 427-433. DOI: 10.31410/EMAN.2021.427.

2022a. Energy efficiency evaluation of green roofs as an intervention strategy in residential buildings in the field of Spanish climate. *Buildings*, 12(7), 959. DOI: 10.3390/buildings12070959.

2022b. Contribution of green roofs to energy savings in building renovations. *Energy for Sustainable Development*, 71, 212-221. DOI: 10.1016/j.esd.2022.09.020.

**Borràs, J.G., Mas, Á., Lerma, C., Gil, E., Vercher, J.**

2021a. Análisis de los costes de los sistemas de cubierta ajardinada. Publicación en el XXXV Salón Tecnológico de la Construcción (EXCO'21), 16-27.

2021b. Cost analysis of green roof systems. Panel publicado en la International Itinerant Exhibition "Research in Building Engineering EXCO'21", sede Spazio Mostre Guido Nardi, Facolta di Architettura e Società, Politecnico di Milano, 21-22.

**Borràs, J.G., Mas, Á., Lerma, C.**

2021c. Green roof as a sustainable and energy efficient construction tool. Capítulo del libro: *Case Studies of Building Rehabilitation and Design*, 13-27. Ed.: Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-71237-2\_2.

**Britto, C.**

2001. Análisis de la viabilidad y comportamiento energético de la cubierta plana ecológica. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

**Caballero, F.R.**

2004. Capítulo 17: Experiencias de cubiertas ecológicas en Madrid. Capítulo del libro: *Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*, 361-376. Ed.: Mundi-Prensa.

**Campiotti, C.A., Schettini, E., Alonzo, G., Viola, C., Bibbiani, C., Mugnozza, G.S., Blanco, I., Vox, G.**

2013. Building green covering for a sustainable use of energy. *Journal of Agricultural Engineering*, 44(s2), e50. DOI: 10.4081/jae.2013.292.

**Campo, C.G.**

2004. Capítulo 9: El componente vegetal en la naturación de azoteas. Capítulo del libro: *Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*, 197-212. Ed.: Mundi-Prensa.

**Carex viviers.**

2022. Sedum spurium var. coccineum. <http://www.carex.cat/ca/vivers-carex/catalog/sedum-spurium-var-coccineum---voodoo--summer-glory.aspx>. Acceso: 23/02/2021.

**Carter, T., Jackson, C.R.**

2007. Vegetated roofs for stormwater management at multiple spatial scales. *Landscape and Urban Planning*, 80(1-2), 84-94. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2006.06.005.

**Carter, T., Keeler, A.**

2008. Life-cycle cost-benefit analysis of extensive vegetated roof systems. *Journal of Environmental Management*, 87(3), 350-363. DOI: 10.1016/j.jenvman.2007.01.024.

**Carter, T.L., Rasmussen, T.C.**

2006. Hydrologic behavior of vegetated roofs. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 42(5), 1261-1274. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2006.tb05299.x.

**Cascone, S.**

2019. Green roof design: State of the art on technology and materials. *Sustainability*, 11(11), 3020. DOI: 10.3390/su11113020.



Castleton, H.F., Stovin, V., Beck, S.B.M., Davison, J.B.

2010. Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit. *Energy and Buildings*, 42(10), 1582-1591. DOI: 10.1016/j.enbuild.2010.05.004.

Castro, A.P.

2020. Desarrollo de una herramienta de simulación térmica de edificios y control jerárquico del confort. Trabajo final de Grado. Universidad de Sevilla.

Catalina, T., Virgone, J., Blanco, E.

2008. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. *Energy and Buildings*, 40(10), 1825-1832. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.04.001.

Cerámicas Moratal.

2022. Hueco 4x16x33.

Chemisana, D., Lamnatou, C.

2014. Photovoltaic-green roofs: An experimental evaluation of system performance. *Applied Energy*, 119, 246-256. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.12.027.

Chenot, J., Gaget, E., Moinardeau, C., Jaunatre, R., Buisson, E., Dutoit, T.

2017. Substrate composition and depth affect soil moisture behavior and plant-soil relationship on Mediterranean extensive green roofs. *Water*, 9(11), 817. DOI: 10.3390/w9110817.

Ching, F.D.K., Shapiro, I.M.

2015. *Arquitectura ecológica. Un manual ilustrado*. Ed.: Gustavo Gili.

Clever Cities Milano.

2022. Rinverdiamo Milano - "Il verde su tetti e pareti". <https://milanoclever.net/cal-1/>. Acceso: 20/07/2021.

Climate Change & Infectious Diseases Group.

2019. Climate adaptation of the eurasian hard tick. <http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/applications.htm>. Acceso: 06/03/2020.

Climate.Onebuilding.org.

2022. Repository of free climate data for buildings performance simulation. [https://climate.onebuilding.org/WMO\\_Region\\_6\\_Europe/ESP\\_Spain/index.html#IDVC\\_Valencia-](https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_6_Europe/ESP_Spain/index.html#IDVC_Valencia-). Acceso: 16/12/2022.

ClubSuculentas.

2022. Sedum Album. <https://clubsuculentas.com/crassulaceae/sedum/sedum-album/>. Acceso: 23/02/2021.

Colegio Territorial de Arquitectos de Valencia (CTAV).

2022. Biblioteca de Ciències Socials Gregori Maians. <http://arquitectosdevalencia.es/arquitectura-de-valencia/1975-2007/biblioteca-de-ciencias-socials-gregori-maians/>. Acceso: 22/07/2020.

Coma, J., Pérez, G., Solé, C., Castell, A., Cabeza, L.F.

2016. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. *Renewable Energy*, 85, 1106-1115. DOI: 10.1016/j.renene.2015.07.074.

Comisión Europea.

2014. Construir una infraestructura verde para Europa. <https://op.europa.eu/es/publication-detail/-/publication/738d80bb-7d10-47bc-b131-ba8110e7c2d6>. Acceso: 28/12/2022.

2020a. Marco sobre clima y energía para 2030. [https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework\\_es](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2030-climate-energy-framework_es). Acceso: 18/11/2021.

2020b. NextGenerationUE: Commission presents next steps for €672.5 billion Recovery and Resilience Facility in 2021 Annual Sustainable Growth Strategy. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_20\\_1658](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_20_1658). Acceso: 05/07/2021.



- 2022a. Enfoque holístico de la UE para el desarrollo sostenible. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/international-strategies/sustainable-development-goals/eu-holistic-approach-sustainable-development\\_es](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/international-strategies/sustainable-development-goals/eu-holistic-approach-sustainable-development_es). Acceso: 30/06/2021.
- 2022b. Un Pacto Verde Europeo. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_es#acciones](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es#acciones). Acceso: 30/06/2021.
- 2022c. Estrategias sobre Biodiversidad para 2030. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030\\_es](https://environment.ec.europa.eu/strategy/biodiversity-strategy-2030_es). Acceso: 30/06/2021.

#### Connelly, M., Hodgson, M.

2013. Experimental investigation of the sound transmission of vegetated roofs. *Applied Acoustics*, 74(10), 1136-1143. DOI: 10.1016/j.apacoust.2013.04.003.

#### Conselleria d'Agricultura, Desenvolupament Rural, Emergència Climàtica i Transició Ecològica (Generalitat Valenciana).

2022. Espais Xarxa Natura 2000 - LIC. <https://agroambient.gva.es/va/web/red-natura-2000/lic>. Acceso: 22/07/2020.

#### Consulta plantas.

2022. [Búsqueda de diferentes especies de plantas]. <http://www.consultaplantas.com/index.php/es/>. Acceso: 17/02/2021.

#### Costa, M.

2010. Valencia reduce con cubiertas vegetales el gasto energético. *Las Provincias*. <https://www.lasprovincias.es/v/20100526/valencia/valencia-reduce-cubiertas-vegetales-20100526.html>. Acceso: 08/05/2020.

#### Cristiano, E., Deidda, R., Viola, F.

2021. The role of green roofs in urban Water-Energy-Food-Ecosystem nexus: A review. *Science of the Total Environment*, 756, 143876. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143876.

#### Cristiano, E., Farris, S., Deidda, R., Viola, F.

2021. Comparison of blue-green solutions for urban flood mitigation: A multi-city large-scale analysis. *PLoS ONE*, 16(1), e0246429. DOI: 10.1371/journal.pone.0246429.

#### Cruz, A.I.

2017. La cubierta verde como mejora del comportamiento energético en Alicante. Trabajo final de Grado. Universitat d'Alacant.

#### CYPE Ingenieros.

2022. Generador de precios de la construcción. España. <http://www.generadordeprecios.info/#gsc.tab=0>. Acceso: 28/07/2022.

#### DakAkker.

2019. DakAkker RooftopFarm. <https://dakakker.nl/site/?lang=en>. Acceso: 31/08/2021.

#### DANOSA España.

2014. Dossier técnico: cubiertas ajardinadas. [https://www.danosa.com/es-es/wp-content/uploads/sites/2/2021/09/descDetalle\\_DESC\\_ARCHIVOdt\\_ajardinadasL11.pdf](https://www.danosa.com/es-es/wp-content/uploads/sites/2/2021/09/descDetalle_DESC_ARCHIVOdt_ajardinadasL11.pdf). Acceso: 28/12/2022.
2020. Tarifa 2020.
- 2021a. Asfaldan R tipo 3 P Pol.
- 2021b. Danopren TR.
- 2021c. Sure real NR EPDM 1.2 negro.
- 2021d. Danofelt PY 200.

#### De Dakdokters.

2022. Polder roofs. <https://dakdokters.nl/en/polder-roofs/>. Acceso: 30/04/2020.

#### De Felipe, I.

2018. "Diseñar edificios sin vegetación supone olvidar las necesidades de los ciudadanos". *El País*. [https://elpais.com/el-pais/2018/11/15/seres\\_urbanos/1542295731\\_076833.html](https://elpais.com/el-pais/2018/11/15/seres_urbanos/1542295731_076833.html). Acceso: 09/04/2020.



Del Barrio, E.P.

1998. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27(2), 179-193. DOI: 10.1016/S0378-7788(97)00029-7.

Dicono.

2022. Aislamiento. [https://www.dicono.es/catalogo\\_de\\_productos/Aislamiento\\_220914.pdf](https://www.dicono.es/catalogo_de_productos/Aislamiento_220914.pdf). Acceso: 16/12/2020.

Diego, F.-J.G., Esteban, B., Merello, P.

2015. Design of a hybrid (wired/wireless) acquisition data system for monitoring of cultural heritage physical parameters in smart cities. *Sensors*, 15(4), 7246-7266. DOI: 10.3390/s150407246.

Dietz, M.E.

2007. Low impact development practices: A review of current research and recommendations for future directions. *Water Air and Soil Pollution*, 186, 351-363. DOI: 10.1007/s11270-007-9484-z.

Domene, E., Saurí, D., Parés, M.

2005. Urbanization and sustainable resource use: The case of garden watering in the metropolitan region of Barcelona. *Urban Geography*, 26(6), 520-535. DOI: 10.2747/0272-3638.26.6.520.

Du, P., Arndt, S.K., Farrell, C.

2019. Is plant survival on green roofs related to their drought response, water use or climate of origin? *Science of the Total Environment*, 667, 25-32. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.02.349.

Emilsson, T., Berndtsson, J.C., Mattsson, J.E., Rolf, K.

2007. Effect of using conventional and controlled release fertiliser on nutrient runoff from various vegetated roof systems. *Ecological Engineering*, 29(3), 260-271. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2006.01.001.

Enciclopedia Concepto.

2022. Concepto de conductividad térmica. <https://concepto.de/conductividad-termica/>. Acceso: 07/10/2020.

EPDM Roofing Association (ERA).

2010. EPDM: A proven performer. <https://epdmroofs.org/resource/epdm-a-proven-performer/>. Acceso: 27/05/2021.

Estévez, R.

2019. Ciudades que se adaptan al cambio climático: Róterdam. *Eco inteligencia*. <https://www.ecointeligencia.com/2019/11/ciudades-cambio-climatico-roterdam/>. Acceso: 31/08/2021.

Eumorfopoulou, E., Aravantinos, D.

1998. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. *Energy and Buildings*, 27(1), 29-36. DOI: 10.1016/S0378-7788(97)00023-6.

Eurostat.

2022. Electricity prices for household consumers - bi-annual data (from 2007 onwards). [https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/NRG\\_PC\\_204\\_\\_custom\\_2063420/default/bar?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/data-browser/view/NRG_PC_204__custom_2063420/default/bar?lang=en). Acceso: 09/02/2022.

Fabbri, K., Tronchin, L., Barbieri, F.

2021. Coconut fibre insulators: The hygrothermal behaviour in the case of green roofs. *Construction and Building Materials*, 266(A), 121026. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121026.

Fahmy, M., Sharples, S., Yahiya, M.

2010. LAI based trees selection for mid latitude urban developments: A microclimatic study in Cairo, Egypt. *Building and Environment*, 45(2), 345-357. DOI: 10.1016/j.buildenv.2009.06.014.

Farrell, C., Ang, X.Q., Rayner, J.P.

2013. Water-retention additives increase plant available water in green roof substrates. *Ecological Engineering*, 52, 112-118. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.12.098



- Farrell, C., Mitchell, R.E., Szota, C., Rayner, J.P., Williams, N.S.G.  
2012. Green roofs for hot and dry climates: Interacting effects of plant water use, succulence and substrate. *Ecological Engineering*, 49, 270-276. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.08.036.
- Feng, C., Meng, Q., Zhang, Y.  
2010. Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42(6), 959-965. DOI: 10.1016/j.enbuild.2009.12.014.
- Fernández, L.V.  
1977. El corcho aislante ideal (y II). *Boletín de información técnica AITIM*, 86.
- Fernández-Salvador, V.  
2012. Simulación energética de una vivienda de consumo casi nulo. *DYNA Energía y Sostenibilidad*, 1(1). DOI: 10.6036/ES1012.
- Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L.G., Principi, P.  
2010. Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8), 1890-1904. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.03.001.
- Flores-Larsen, S., Filippín, C.  
2021. Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231, 110576. DOI: 10.1016/j.enbuild.2020.110576.
- Foster + Partners.  
2022. Masdar Institute. <https://www.fosterandpartners.com/projects/masdar-institute/>. Acceso: 30/06/2021.
- Frankenstein, S., Koenig, G.  
2004. FASST Vegetation Models. Informe para Cold Regions Research and Engineering Laboratory, de U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- Freney, M., Soebarto, V., Williamson, T.  
2013. Thermal comfort of global model Earthship in various European climates. Publicación en la 13th Conference of International Building Performance Simulation Association (BS2013), 1625-1632.
- Fundació de la Jardineria i el Paisatge. Normas  
2012. Tecnològiques de Jardineria y Paisajismo NTJ 11C, "Ajardinamientos especiales. Cubiertas Verdes".
- Gallardo, N.P., Rogério, A., Neves, G.F., Vecchia, F.A., Roriz, V.F.  
2018. Reacción frente al frío de edificaciones con envolventes vegetales para climas tropicales. Fachadas verdes y cubiertas ajardinadas. *Revista Ingeniería de Construcción*, 33(1), 15-28. DOI: 10.4067/S0718-50732018000100015.
- Gálvez, H.R.  
2022. Cubiertas vegetales. *Mimbrea*. <http://www.mimbrea.com/cubiertas-vegetales/>. Acceso: 01/05/2020.
- García, P.V.  
2016. Estudio del comportamiento de sustratos para su uso como cubierta ecológica en el Sureste de España. Trabajo final de Grado. Universidad Politécnica de Cartagena.
- Gardenia.  
2022. Hardiness Zones/10. <https://www.gardenia.net/plants/hardiness-zones/10>. Acceso: 18/05/2020.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Andresen, J.A.  
2007. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.06.004.
- Getter, K.L., Rowe, D.B., Cregg, B.M.  
2009. Solar radiation intensity influences extensive green roof plant communities. *Urban Forestry and Urban Greening*, 8(4), 269-281. DOI: 10.1016/j.ufug.2009.06.005.



Gil, E., Lerma, C., Vercher, J., Mas, Á.

2017. Methodology for thermal behaviour assessment of homogeneous façades in heritage buildings. *Journal of Sensors*, 2017(2), 3280691. DOI: 10.1155/2017/3280691.

Gobierno de España.

2021. Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. [https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documentos/30042021-Plan\\_Recuperacion\\_%20Transformacion\\_%20Resiliencia.pdf](https://www.lamoncloa.gob.es/temas/fondos-recuperacion/Documentos/30042021-Plan_Recuperacion_%20Transformacion_%20Resiliencia.pdf). Acceso: 28/12/2022.

Gomes, M.G., Silva, C.M., Valadas, A.S., Silva, M.

2019. Impact of vegetation, substrate, and irrigation on the energy performance of green roofs in a Mediterranean climate. *Water*, 11(10), 2016. DOI: 10.3390/w11102016.

Gómez, A.P.-N., Torres, A.M., López, E.P., Doménech, I.A., Solar, D.A., Momparler, S.P., García, P.P.P.

2015. Report on the green roof monitoring in Benaguasil. Informe para el E2STORMED PROJECT: Improvement of energy efficiency in the water cycle by the use of innovative storm water management in smart Mediterranean cities.

Gómez, E.D.

2015. Habitar la cubierta como espacio urbano. Proyecto Final de Carrera. Universidad Francisco de Vitoria (Madrid).

Graceson, A., Hare, M., Monaghan, J., Hall, N.

2013. The water retention capabilities of growing media for green roofs. *Ecological Engineering*, 61(A), 328-334. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.09.030.

Grupo Aranea, Cervera, J.C.

2018. Dos. Del dibujo al proyecto (La cristalización de la idea). *En Blanco*, 25(10), 16-77. DOI: 10.4995/eb.2018.10646.

Grupo de Trabajo de Conama 2014.

2014. GT-4 Infraestructuras verdes urbanas y periurbanas. Documento de síntesis del Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA 2014).

Guerra-Santin, O., Tweed, C.A.

2015. In-use monitoring of buildings: An overview of data collection methods. *Energy and Buildings*, 93, 189-207. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.02.042.

Gutiérrez, B.

2020. "Cool roof" o cómo combatir las altas temperaturas desde la cubierta de un edificio. *Green Building Council España*. <https://gbce.es/blog/2020/07/23/cool-roof-como-combatir-las-altas-temperaturas-desde-la-cubierta-de-un-edificio/>. Acceso: 06/07/2021.

Hammond, G.P., Jones, C.I.

2008. Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Energy*, 161(2), 87-98. DOI: 10.1680/ener.2008.161.2.87.

Hartig, T., Kahn, P.H.

2016. Living in cities, naturally. *Science*, 352(6288), 938-940. DOI: 10.1126/science.aaf3759.

He, Y., Yu, H., Ozaki, A., Dong, N.

2020. Thermal and energy performance of green roof and cool roof: A comparison study in Shanghai area. *Journal of Cleaner Production*, 267, 122205. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.122205.

Hoelscher, M.-T., Nehls, T., Jänicke, B., Wessolek, G.

2016. Quantifying cooling effects of facade greening: Shading, transpiration and insulation. *Energy and Buildings*, 114, 283-290. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.06.047.

Huang, C.C., Busch, C., He, D., Harvey, H.

2015. 12 Green Guidelines. Informe para China Development Bank Capital (CDBC), Energy Innovation: Policy and Technology LLC y Energy Foundation China.



Huang, C.-L., Hsu, N.-S., Liu, H.-J., Huang, Y.-H.

2018. Optimization of low impact development layout designs for megacity flood mitigation. *Journal of Hydrology*, 564, 542-558. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.07.044.

Instituto Monsa de Ediciones.

2007. *Nuevo paisajismo urbano*. Monografías. Ed.: Instituto Monsa de Ediciones.

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE).

2007. Guía técnica para la rehabilitación de la envolvente térmica de los edificios. Soluciones con aislamiento de poliuretano.  
2011. Análisis del consumo energético del sector residencial en España.  
2012. Guía técnica de instalaciones de climatización con equipos autónomos.  
2014. Factores de emisión de CO<sub>2</sub> y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España.  
2019. Consumo de energía final. <https://sieeweb.idae.es/consumofinal/>. Último acceso: 05/07/2021.

Instituto Valenciano de la Edificación (IVE).

2011. *Catálogo de Soluciones Constructivas de Rehabilitación*. Ed.: Conselleria de Medio Ambiente, Agua, Urbanismo y Vivienda, Generalitat Valenciana.  
2015. Estudio del Potencial de ahorro energético y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> en la Comunitat Valenciana. Informe para el proyecto Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks (EPISCOPE).  
2022a. Catálogo de Elementos Constructivos. <https://www.five.es/acceso-cec/>. Acceso: 23/07/2020.  
2022b. Precios de construcción. Módulo de edificación y rehabilitación. <https://www.five.es/productos/herramientas-on-line/modulo-de-edificacion/>. Acceso: 28/07/2022.

International Energy Agency.

2022. Data browser - Spain. <https://www.iea.org/countries/spain>. Acceso: 04/10/2022.

International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).

2016. Water futures and solution. Fast track initiative - Final Report.

Jaffal, I., Ouldboukhite, S.-E., Belarbi, R.

2012. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157-164. DOI: 10.1016/j.renene.2011.12.004.

Jang, A., Seo, Y., Bishop, P.L.

2005. The removal of heavy metals in urban runoff by sorption on mulch. *Environmental Pollution*, 133(1), 117-127. DOI: 10.1016/j.envpol.2004.05.020.

Jim, C.Y.

2017. An archaeological and historical exploration of the origins of green roofs. *Urban Forestry and Urban Greening*, 27, 32-42. DOI: 10.1016/j.ufug.2017.06.014.

Jim, C.Y., Chen, W.Y.

2006. Impacts of urban environmental elements on residential housing prices in Guangzhou (China). *Landscape and Urban Planning*, 78(4), 422-434. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.12.003.

Kampodomo.

2019. 5 impresionantes edificios con cubiertas vegetales. <https://kampodomo.com/blog/5-impresionantes-edificios-con-cubiertas-vegetales/>. Acceso: 09/04/2020.

Kazemi, M., Courard, L.

2022. Modelling thermal and humidity transfers within green roof systems: effect of rubber crumbs and volcanic gravel. *Advances in Building Energy Research*, 16(3), 296-321. DOI: 10.1080/17512549.2020.1858961.



- Köhler, M., Schmidt, M., Grimme, F.W., Laar, M., Paiva, V.L.A., Tavares, S.  
2002. Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics - Far beyond the aesthetics. *Environmental Management and Health*, 13(4), 382-391. DOI: 10.1108/09566160210439297.
- Kosareo, L., Ries, R.  
2007. Comparative environmental life cycle assessment of green roofs. *Building and Environment*, 42(7), 2606-2613. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.019.
- Kruis, N.J., Heun, M.K.  
2007. Analysis of the performance of Earthship housing in various global climates. Publicación en la Energy Sustainability Conference (ES2007), 36030.
- Krzemińska, A., Zareba, A., Dzikowska, A.  
2017. Bioarchitecture – a new vision of energy sustainable cities. Publicación en la International Conference on Advances in Energy Systems and Environmental Engineering (ASEE17), *E3S Web of Conferences*, 22, 00091. DOI: 10.1051/e3s-conf/20172200091.
- Kumar, R., Kaushik, S.C.  
2005. Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40(11), 1505-1511. DOI: 10.1016/j.buildenv.2004.11.015.
- Landscape Development and Landscaping Research Society e. V. (FLL).  
2018. *Green Roof Guidelines. Guidelines for the planning, construction and maintenance of green roofs*. Ed.: FLL.
- Lazzarin, R.M., Castellotti, F., Busato, F.  
2005. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. *Energy and Buildings*, 37(12), 1260-1267. DOI: 10.1016/j.enbuild.2005.02.001.
- Lerma, C.  
2012. Análisis arquitectónico y constructivo del Real Colegio de Corpus Christi de Valencia. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.  
2020. *Cerramientos de Hormigón in Situ*. Ed. Tirant lo Blanch.
- Lerma, C., Barreira, E., Almeida, R.M.S.F.  
2018. A discussion concerning active infrared thermography in the evaluation of buildings air infiltration. *Energy and Buildings*, 168, 56-66. DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.02.050.
- Lerma, C., Borràs, J.G., Mas, Á., Torner, M.E., Vercher, J., Gil, E.  
2021. Evaluation of hygrothermal behaviour in heritage buildings through sensors, CFD modelling and IRT. *Sensors*, 21(2), 566. DOI: 10.3390/s21020566.
- Lesjak, V., Pajek, L., Košir, M.  
2020. Indirect green façade as an overheating prevention measure. *Garđevinar*, 72(7), 569-583. DOI: 10.14256/JCE.2797.2019.
- Levitt, B.  
2017. VT5.3 Infiltration and Ventilation in EnergyPlus. [https://www.youtube.com/watch?v=Az5p95rIpRI&ab\\_channel=Brendon-Levitt](https://www.youtube.com/watch?v=Az5p95rIpRI&ab_channel=Brendon-Levitt). Acceso: 14/12/2021.
- LG.  
2022. LG XBOOM CM2460, Microcadena con 100W de potencia.
- Li, W.C., Yeung, K.K.A.  
2014. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 127-134. DOI: 10.1016/j.ijbsbe.2014.05.001.





Lin, Y.-J., Lin, H.-T.

2011. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. *Building and Environment*, 46(2), 345-355. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.07.027.

Liu, K.

2003. Engineering performance of rooftop gardens through field evaluation. Publicación en el RCI 18th International Convention & Trade Show, 1-15.

Liu, K., Minor, J.

2005. Performance evaluation of an extensive green roof. Publicación en el Greening Rooftops for Sustainable Communities, 1-11.

Liu, K.S., Liao, Y.T., Hsueh, S.L.

2017. Implementing smart green building architecture to residential project based on Kaohsiung, Taiwan. *Applied Ecology and Environmental Research*, 15(2), 159-171. DOI: 10.15666/aeer/1502\_159171.

Liu, T.-C., Shyu, G.-S., Fang, W.-T., Liu, S.-Y., Cheng, B.-Y.

2012. Drought tolerance and thermal effect measurements for plants suitable for extensive green roof planting in humid subtropical climates. *Energy and Buildings*, 47, 180-188. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.11.043.

Llopis, M.T.

2010. Aprender sobre las cubiertas verdes urbanas a través del caso Augustenborg. Tesina-Trabajo final de Máster. Universitat Politècnica de Catalunya.

Llumor.

2022. La refrigeración en LEDs. <https://llumor.es/info-led/la-refrigeracion-en-leds/>. Acceso: 29/06/2022.

Lopez-Besora, J., Coch, H., Pardal, C.

2019. Contemporary roof design concepts: Learning from vernacular architecture. Capítulo del libro: *Sustainable Vernacular Architecture*, 357-376. Ed.: Springer.

Lundholm, J., Maclvor, J.S., MacDougall, Z., Ranalli, M.

2010. Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions. *PLoS ONE*, 5(3), e9677. DOI: 10.1371/journal.pone.0009677.

Machado, M.V., Britto, C., Neila, J.

2003. El cálculo de la conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica. *Ambiente Construido*, 3(3), 65-76.

Maclvor, J.S., Lundholm, J.

2011. Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37(3), 407-417. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2010.10.004.

Maiztegui, B.

2020. Balcones con vegetación: detalles y secciones de jardines en altura. *ArchDaily*. <https://www.archdaily.cl/cl/936142/balcones-con-vegetacion-detalles-y-secciones-de-jardines-en-altura>. Acceso: 01/05/2020.

Manso, M., Castro-Gomes, J.

2015. Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 863-871. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.203.

Manso, M., Teotónio, I., Silva, C.M., Cruz, C.O.

2021. Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110111. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110111.

María-Tomé, J.S.

2002. Antecedentes normativos en España sobre elementos resistentes. Las autorizaciones de uso y la certificación. [http://www.andece.org/images/BIBLIOTECA/reglamentacin\\_espanola\\_forjados.pdf](http://www.andece.org/images/BIBLIOTECA/reglamentacin_espanola_forjados.pdf). Acceso: 28/12/2022.



Martina, P., Fabrizio, C., Giovanni, S.

2020. Evaluation of multifunctional aspects of a green roof in mitigating the negative effects of urbanization in Mediterranean environment. Capítulo del libro: *Green Buildings and Renewable Energy*, 371-382. Ed.: Springer.

Martínez, A.

2005. *Habitar la cubierta*. Ed.: Gustavo Gili.

Martínez, C.E.

2006. La reconciliació de l'escala urbana. *Ide@sostenible*, 4(15).

Mas, Á.

2020. *Cubiertas planas sin ventilar*. Ed.: Editorial Universitat Politècnica de València (UPV).

2021. *Cubiertas en plano inclinado. Diseño y tipología*. Ed.: Editorial Universitat Politècnica de València (UPV).

Masdar.

2022. Masdar City. <https://masdar.ae/en>. Acceso: 30/06/2021.

Materiales Navarro.

2010. Losa Filtrante.

Mentens, J., Raes, D., Hermy, M.

2006. Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and Urban Planning*, 77(3), 217-226. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2005.02.010.

Merello, P., Diego, F.-J.G., Zarzo, M.

2012. Microclimate monitoring of Ariadne's house (Pompeii, Italy) for preventive conservation of fresco paintings. *Chemistry Central Journal*, 6, 145. DOI: 10.1186/1752-153X-6-145.

2014. Diagnosis of abnormal patterns in multivariate microclimate monitoring: A case study of an open-air archaeological site in Pompeii (Italy). *Science of the Total Environment*, 488-489, 14-25. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.04.068.

Meteo Navarra.

2022. Clasificación climática de Köppen. <http://meteo.navarra.es/definiciones/koppen.cfm>. Acceso: 23/07/2020.

Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030 (Gobierno de España).

2021. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). <https://www.mdsocialesa2030.gob.es/agenda2030/index.htm>. Acceso: 10/11/2022.

Ministerio de Fomento (Gobierno de España).

2003. Borrador del Documento Básico DB-HS - Salubridad.

2009. Documento Básico DB-SE-AE - Seguridad Estructural. Acciones en la edificación.

2013. Documento de Apoyo DA DB-HE/2 - Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales de los cerramientos.

2014. Documento de Apoyo DA DB-HE/3 - Puentes térmicos.

2017. Documento descriptivo climas de referencia.

2022a. Documento Básico DB-HE - Ahorro de energía.

2022b. Documento Básico DB-HS - Salubridad.

Ministerio de Presidencia (Gobierno de España).

2021. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE).

Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (Gobierno de España).

2020a. Documento de Apoyo DA DB-HE/1 - Cálculo de parámetros característicos de la envolvente.

2020b. Actualización 2020 de la Estrategia a largo plazo para la Rehabilitación Energética en el Sector de la Edificación en España (ERESEE 2020).

**Ministerio de Vivienda (Gobierno de España).**

1976. Norma Tecnológica de la Edificación NTE-QAA/1796, "Cubiertas, Azoteas Ajardinadas".  
2010. Catálogo de elementos constructivos del CTE.

**Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (Gobierno de España).**

- 2022a. Nota informativa sobre el Avance de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero correspondientes al año 2021.  
2022b. Energía y desarrollo sostenible, Documentos reconocidos. <https://energia.gob.es/desarrollo/EficienciaEnergetica/CertificacionEnergetica/DocumentosReconocidos/Paginas/documentosreconocidos.aspx>. Acceso: 09/03/2022.  
2022c. Boletín Hidrológico. <http://portal.miteco.gob.es/BoleHWeb/>. Acceso: 15/03/2022.

**Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (Gobierno de España).**

2020. Condiciones técnicas de los procedimientos para la evaluación de la eficiencia energética.

**Ministry of Housing, Communities & Local Government (United Kingdom Government).**

- 2016a. L1A: Conservation of fuel and power in new dwellings.  
2016b. L2A: conservation of fuel and power in new buildings other than dwellings.

**Miranda, M.R.**

1996. Azotea aljibe. *Agricultura*, 773, 1032-1033.

**Mohammadi, K., Sobouti, H.**

2016. Principles of sustainable architecture design in crowded residential complexes with an outlook to resuscitation of nature in architecture. *The Turkish Online Journal of Design, Art and Communication - TOJDAC*, August Special Edition, 1673-1681. DOI: 10.7456/1060AGSE/049.

**Molina, M.C.**

2020. Naturaleza y hormigón. Espai Verd. *En Blanco*, 28(12), 140-146. DOI: 10.4995/eb.2020.13310.

**Monteiro, C.M., Calheiros, C.S.C, Martins, J.P., Costa, F.M., Palha, P., De Freitas, S., Ramos, N.M.M., Castro, P.M.L.**

2017. Substrate influence on aromatic plant growth in extensive green roofs in a Mediterranean climate. *Urban Ecosystems*, 20, 1347-1357. DOI: 10.1007/s11252-017-0687-9.

**Monterusso, M.A., Rowe, D.B., Rugh, C.L., Russell, D.K.**

2004. Runoff water quantity and quality from green roof system. Publicación en el XXVI International Horticultural Congress: Expanding Roles for Horticulture in Improving Human Well-Being and Life Quality, *Acta Horticulturae*, 639, 369-376. DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.639.49.

**Mppt Solar.**

2022. Orientación e inclinación de los paneles. <https://www.mpptsolar.com/es/orientacion-inclinacion-paneles-solares.html>. Acceso: 22/07/2020.

**Muñoz, V.B.**

2016. Metodología para la simulación energética de un edificio terciario empleando la herramienta Energy Plus. Trabajo final de Grado. Universidad Politécnica de Madrid.

**MVRDV.**

2021. *Rooftop Catalogue*. Ed.: Rotterdamse Dakendagen.

**Nagase, A., Dunnett, N.**

2010. Drought tolerance in different vegetation types for extensive green roofs: Effects of watering and diversity. *Landscape and Urban Planning*, 97(4), 318-327. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.07.005.  
2012. Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure. *Landscape and Urban Planning*, 104(3-4), 356-363. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2011.11.001.



Nagase, A., Dunnett, N., Choi, M.-S.

2013. Investigation of weed phenology in an establishing semi-extensive green roof. *Ecological Engineering*, 58, 156-164. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.007.

Neila, F.J., Frutos, C.B., Britto, C.

2004. Capítulo 12: La cubierta ecológica en el contexto de la arquitectura bioclimática. Capítulo del libro: *Naturación urbana: cubiertas ecológicas y mejora medioambiental*, 241-265. Ed.: Mundi-Prensa.

Nektarios, P.A., Kokkinou, I., Ntoulas, N.

2021. The effects of substrate depth and irrigation regime, on seeded Sedum species grown on urban extensive green roof systems under semi-arid Mediterranean climatic conditions. *Journal of Environmental Management*, 279, 111607. DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.111607.

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

2001. Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33(7), 719-729. DOI: 10.1016/S0378-7788(01)00062-7.

Nieva, A.B., Del Pozo, A.V.-E.

2005. *Guía de construcción sostenible*. Ed.: Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS).

Novoa, W.A.

2016. Las cubiertas verdes y su implicación en las estructuras, desde el punto de vista del diseño, lo económico y la sostenibilidad ambiental. Trabajo final de Grado. Universidad Militar Nueva Granada.

Oke, T.R.

2002. Chapter 4. Climates of vegetated surfaces. Capítulo del libro: *Boundary Layer Climates*, 110-157. Ed.: Taylor & Francis Group.

Olivieri, F., Di Perna, C., D'Orazio, M., Olivieri, L, Neila, J.

2013. Experimental measurements and numerical model for the summer performance assessment of extensive green roofs in a Mediterranean coastal climate. *Energy and Buildings*, 63, 1-14. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.03.054.

ONU-Habitat.

2020. Plan estratégico del Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos humanos para el período 2020-2023.

Organización de las Naciones Unidas (ONU).

2020. La carrera hacia las cero emisiones de gases de efecto invernadero, y por qué el planeta depende de ella. <https://news.un.org/es/story/2020/12/1484952>. Acceso: 27/05/2021.

Ortiz, L.L.

2018. Análisis constructivo de las cubiertas inundadas. Trabajo final de Grado. Universitat Politècnica de Valencia.

Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Sailor, D.J.

2014. Experimental and numerical investigation of urban street canyons to evaluate the impact of green roof inside and outside buildings. *Applied Energy*, 114, 273-282. DOI: 10.1016/j.apenergy.2013.09.073.

Ouldboukhitine, S.-E., Spolek, G., Belarbi, R.

2014. Impact of plants transpiration, grey and clean water irrigation on the thermal resistance of green roofs. *Ecological Engineering*, 67, 60-66. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2014.03.052.

Overstreet, K.

2021. How can green cities create equitable futures? *ArchDaily*. <https://www.archdaily.com/956380/how-can-green-cities-create-equitable-futures>. Acceso: 11/02/2021.

Pandit, R., Laband, D.N.

2010. Energy savings from tree shade. *Ecological Economics*, 69(6), 1324-1329. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2010.01.009.

**Paradela, M.L.S.**

- 2020a. Capítulo 7: Cubiertas plana. Componentes. Capítulo del libro: *Técnicas de construcción convencionales y avanzadas: fachadas y cubiertas*, 154-183. Ed.: García-Maroto Editores S.L.
- 2020b. Capítulo 8: Cubiertas planas transitables. Capítulo del libro: *Técnicas de construcción convencionales y avanzadas: fachadas y cubiertas*, 184-207. Ed.: García-Maroto Editores S.L.
- 2020c. Capítulo 9: Cubiertas planas no transitables. Capítulo del libro: *Técnicas de construcción convencionales y avanzadas: fachadas y cubiertas*, 208-229. Ed.: García-Maroto Editores S.L.
- 2020d. Capítulo 10: Cubiertas planas ajardinadas. Capítulo del libro: *Técnicas de construcción convencionales y avanzadas: fachadas y cubiertas*, 230-241. Ed.: García-Maroto Editores S.L.

**Peen, J., Schoevers, R.A., Beekman, A.T., Dekker, J.**

2010. The current status of urban-rural differences in psychiatric disorders. *Acta Psychiatrica Scandinavica*, 121(2), 84-93. DOI: 10.1111/j.1600-0447.2009.01438.x.

**Penonić, K.**

2016. Green roofs as a modern concept of green building and its benefits to environment. *Balkan Green Energy News*. <https://balkangreenenergynews.com/green-roofs-as-a-modern-concept-of-green-building-and-its-benefits-to-environment/>. Acceso: 09/04/2020.

**Pérez, G., Coma, J., Martorell, I., Cabeza, L.F.**

2014. Vertical Greenery Systems (VGS) for energy saving in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 139-165. DOI: 10.1016/j.rser.2014.07.055.

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

2011. Behaviour of green facades in Mediterranean Continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52(4), 1861-1867. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.11.008.

**Pérez, G., Vila, A., Rincón, L., Solé, C., Cabeza, L.F.**

2012. Use of rubber crumbs as drainage layer in green roofs as potential energy improvement material. *Applied Energy*, 97, 347-354. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.11.051.

**Perfect Prime.**

- 2022a. Prime capsule portable data logger. [https://cdn.shopify.com/s/files/1/1291/1589/files/TH0165\\_new\\_manual\\_7a5fca2d-a739-4042-bcb2-6a870b8cc93c.pdf?13679988968750926951](https://cdn.shopify.com/s/files/1/1291/1589/files/TH0165_new_manual_7a5fca2d-a739-4042-bcb2-6a870b8cc93c.pdf?13679988968750926951). Acceso: 29/07/2021.
- 2022b. PerfectPrime TH1165 USB Temperature/Humidity Data logger. [https://perfectprime.com/products/th1165?\\_pos=16&\\_sid=99ca056f7&\\_ss=r&variant=12174459404363](https://perfectprime.com/products/th1165?_pos=16&_sid=99ca056f7&_ss=r&variant=12174459404363). Acceso: 29/07/2021.

**Peri, G., Traverso, M., Finkbeiner, M., Rizzo, G.**

2012. The cost of green roofs disposal in a life cycle perspective: Covering the gap. *Energy*, 48(1), 406-414. DOI: 10.1016/j.energy.2012.02.045.

**Pladur.**

2015. PLADUR N-Terminación normal.

**Plantas y flores.**

2021. Sedum spurium. <https://plantayflor.blogspot.com/2013/03/sedum-spurium.html>. Acceso: 23/02/2021.

**Presidencia del Gobierno (Gobierno de España).**

1979. Norma Básica de la Edificación sobre Condiciones Térmicas (NBE-CT-79). <https://www.boe.es/eli/es/rd/1979/07/06/2429>. Acceso: 02/11/2020.

**Procaccini, G., Monticelli, C.**

2021. A green roof case study in the urban context of Milan: Integrating the residential and cultivation functions for sustainable development. *Water*, 13(2), 137. DOI: 10.3390/w13020137.

**PwC.**

2018. La gestión del agua en España. Análisis y retos del ciclo urbano del agua. Informe para Acciona.



Ramírez, J.D.M.

2019. *Proyecto arquitectónico de máxima eficiencia energética*. Ed.: Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Ramos, F.

1997. Pequeña historia de urgencia de la cubierta plana. *Tectónica*, 6, 4-11.

Rayner, J.P., Farrell, C., Raynor, K.J., Murphy, S.M., Williams, N.S.G.

2016. Plant establishment on a green roof under extreme hot and dry conditions: The importance of leaf succulence in plant selection. *Urban Forestry and Urban Greening*, 15, 6-14. DOI: 10.1016/j.ufug.2015.11.004.

Real Academia Española (RAE).

2022. Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/>. Acceso: 22/07/2020.

Reyes-Paecke, S., Gironás, J., Melo, O., Vicuña, S., Herrera, J.

2019. Irrigation of green spaces and residential gardens in a Mediterranean metropolis: Gaps and opportunities for climate change adaptation. *Landscape and Urban Planning*, 182, 34-43. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2018.10.006.

ROCKWOOL Peninsular.

2020. 10 hecho sobre el comportamiento del agua sobre la lana de roca ROCKWOOL. [https://www.rockwool.com/sys/siteassets/rw-es/herramientas/biblioteca-de-documentos/fichas-informativas/fact-sheets-rockwool\\_humedad-sp.pdf](https://www.rockwool.com/sys/siteassets/rw-es/herramientas/biblioteca-de-documentos/fichas-informativas/fact-sheets-rockwool_humedad-sp.pdf). Acceso: 16/12/2020.

Rowe, D.B.

2011. Green roofs as a means of pollution abatement. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2100-2110. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.10.029.

Sailor, D.J.

2008. A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466-1478. DOI: 10.1016/j.enbuild.2008.02.001.

Saint-Gobain.

2022. SGG Planistar ONE. <https://www.saint-gobain-glass.es/es/ssg-planistar-one>. Acceso: 28/06/2022.

Salvador, R., Bautista-Capetillo, C., Playán, E.

2011. Irrigation performance in private urban landscapes: A study case in Zaragoza (Spain). *Landscape and Urban Planning*, 100(3), 302-311. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2010.12.018.

Samsung.

2019. TV AU7105 Crystal UHD 163 cm 65" 4K Smart TV.

Santamouris, M.

2014. Cooling the cities – A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003.

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

2007. 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. DOI: 10.1016/j.energy.2006.11.011.

Scharf, B., Kraus, F.

2019. Green roofs and greenpass. *Buildings*, 9(9), 205. DOI: 10.3390/buildings9090205.

Scholz-Barth, K.

2001. Green roofs: Stormwater management from the top down. *Environmental Design & Construction*, January/February Issue.



Schrader, S., Böning, M.

2006. Soil formation on green roofs and its contribution to urban biodiversity with emphasis on Collembolans. *Pedobiologia*, 50(4), 347-356. DOI: 10.1016/j.pedobi.2006.06.003.

Schroll, E., Lambrinos, J.G., Sandrock, D.

2011. An evaluation of plant selections and irrigation requirements for extensive green roofs in the Pacific northwestern Pacific United States. *HortTechnology*, 21(3), 314-322. DOI: 10.21273/HORTTECH.21.3.314.

Schweitzer, O., Erell, E.

2014. Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate. *Energy and Buildings*, 68(A), 25-32. DOI: 10.1016/j.enbuild.2013.09.012.

Seoul Solution.

2017. Roof gardening support project for private buildings. <https://seoulsolution.kr/en/node/6337>. Acceso: 30/06/2021.

Serra, V., Bianco, L., Candelari, E., Giordano, R., Montacchini, E., Tedesco, S., Larcher, F., Schiavi, A.

2017. A novel vertical greenery module system for building envelopes: The results and outcomes of a multidisciplinary research project. *Energy and Buildings*, 146, 333-352. DOI: 10.1016/j.enbuild.2017.04.046.

Shafique, M., Kim, R., Lee, D.

2016. The potential of green-blue roof to manage storm water in urban areas. *Nature Environment and Pollution Technology*, 15(2), 715-718.

Shafique, M., Kim, R., Rafiq, M.

2018. Green roof benefits, opportunities and challenges – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 90, 757-773. DOI: 10.1016/j.rser.2018.04.006.

Shao, B., Du, X., Ren, Q.

2018. Numerical investigation of energy saving characteristic in building roof coupled with PCM using Lattice Boltzmann method with economic analysis. *Applied Sciences*, 8(10), 1739. DOI: 10.3390/app8101739.

Sheppard Robson.

2022. Siemens Middle East Headquarters. <https://www.sheppardrobson.com/projects/siemens-middle-east-hq>. Acceso: 30/06/2021.

Shin, E., Kim, H.

2019. Benefit–cost analysis of green roof initiative projects: The case of Jung-gu, Seoul. *Sustainability*, 11(12), 3319. DOI: 10.3390/su11123319.

Silva, M.F. da R.

2014. Green roof energy simulation. [https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146457482/Extended%20Abstract\\_Marcelo\\_Silva.pdf](https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395146457482/Extended%20Abstract_Marcelo_Silva.pdf). Acceso: 28/12/2022.

Simmons, M.T., Gardiner, B., Windhager, S., Tinsley, J.

2008. Green roofs are not created equal: the hydrologic and thermal performance of six different extensive green roofs and reflective and non-reflective roofs in a sub-tropical climate. *Urban Ecosystems*, 11, 339-348. DOI: 10.1007/s11252-008-0069-4.

Singular green.

2022. Cubiertas vegetales. <https://www.singulargreen.com/cubiertas-vegetales/>. Acceso: 01/05/2020.

Sistemas de Cubiertas Vegetales.

2018. Ciudades pioneras en legislación y proyectos de cubiertas verdes. <https://www.cubiertasajardinadas.com/nueva-legislacion-de-techos-verdes/>. Acceso: 02/06/2020.



### Sólo Arquitectura.

2019. Caso práctico SG SAVE/OpenStudio con suelo radiante y refrescante, aerotermia. <https://www.soloarquitectura.com/foros/threads/caso-practico-sg-save-openstudio-con-suelo-radiante-y-refrescante-aerotermia.109878/>. Acceso: 09/12/2021.

### Speak, A.F., Rothwell, J.J., Lindley, S.J., Smith, C.L.

2013. Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate*, 3, 40-55. DOI: 10.1016/j.uclim.2013.01.001.

### Sutton, R.K.

2015. Introduction to green roof ecosystems. Capítulo del libro: *Green Roof Ecosystems*, 1-25. Ed.: Springer.

### Tectónica.

2011. *Tectónica 34. Cubierta: nuevos usos*. Ed.: ATC Ediciones S.L.

### Teemusk, A., Mander, Ü.

2007. Rainwater runoff quantity and quality performance from a greenroof: The effects of short-term events. *Ecological Engineering*, 30(3), 271-277. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2007.01.009.

### TEGNOS Research.

2010. Life cycle inventory and assessment of selected low slope roofing systems in North America. Informe para EPDM Roofing Association (ERA).

### Teknautas.

2015. Barcelona y Palma de Mallorca ya tienen los primeros autobuses con azotea ajardinada. *El Confidencial*. [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2015-05-04/barcelona-y-palma-de-mallorca-ya-tienen-los-primeros-autobuses-con-azotea-ajardinada\\_787493/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2015-05-04/barcelona-y-palma-de-mallorca-ya-tienen-los-primeros-autobuses-con-azotea-ajardinada_787493/). Acceso: 22/06/2020.

### Telichenko, V., Benuzh, A., Mochalov, I.

2017. Landscape architecture and green spaces in Russia. Publicación en XXVI R-S-P Seminar 2017, Theoretical Foundation of Civil Engineering, *MATEC Web of Confernces*, 117, 00164. DOI: 10.1051/mateconf/201711700164.

### Teng, T.V., Kasim, N., Zainal, R., Musa, S.M.S., Noh, H.M.

2021. Study of green roof system implementation in green building construction. *Research in Management of Technology and Business*, 2(1), 734-750. DOI: 10.30880/rmtb.2021.02.01.057.

### Terradas, J., Savé, R.

1992. The influence of summer and winter stress and water relationships on the distribution of *Quercus ilex* L. Capítulo del libro: *Quercus ilex L. ecosystems: function, dynamics and management*, 137-145. Ed.: Springer.

### Thwink.org Inc.

2014. The three pillars of sustainability. <https://www.thwink.org/sustain/glossary/ThreePillarsOfSustainability.htm>. Acceso: 09/04/2020.

### Tiwari, A., Kumar, P., Kalaiarasan, G., Ottosen, T.-B.

2021. The impacts of existing and hypothetical green infrastructure scenarios on urban heat island formation. *Environmental Pollution*, 274, 115898. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.115898.

### Townshend, D.

2017. Study on green roof application in Hong Kong. Informe para el Urbis Limited y Leigh & Orange Ltd.

### U.S. Department of Energy's Building Technologies Office (DOE BTO).

2022. EnergyPlus. <https://energyplus.net/>. Acceso: 09/03/2022.

### Van der Meulen, S.H.

2019. Costs and benefits of green roof types for cities and building owners. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 7(1), 57-71. DOI: 10.13044/j.sdewes.d6.0225.





Van Mechelen, C., Dutoit, T., Hermy, M.

2015. Vegetation development on different extensive green roof types in a Mediterranean and temperate maritime climate. *Ecological Engineering*, 82, 571-582. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.05.011.

VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Fernandez, R.T., Xiao, L.

2005a. Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth. *Journal of Environmental Quality*, 34(3), 1036-1044. DOI: 10.2134/jeq2004.0364.

VanWoert, N.D., Rowe, D.B., Andresen, J.A., Rugh, C.L., Xiao, L.

2005b. Watering regime and green roof substrate design affect *Sedum* plant growth. *HortScience*, 40(3), 659-664. DOI: 10.21273/HORTSCI.40.3.659.

Vestrella, A.

2016. Cubiertas ajardinadas en ambiente mediterráneo: aspectos ecofisiológicos y agronómicos. Tesis doctoral. Universitat de Barcelona.

Vicepresidencia Segunda y Consejería de Vivienda y Arquitectura Bioclimática (Generalitat Valenciana).

2021. Convocatoria para el ejercicio 2021 de subvenciones para la mejora de las condiciones del interior de las viviendas, en el marco del Plan de reforma interior de vivienda, Plan Renhata.

Vijayaraghavan, K.

2016. Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 740-752. DOI: 10.1016/j.rser.2015.12.119.

Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M.

2014. Can green roof act as a sink for contaminants? A methodological study to evaluate runoff quality from green roofs. *Environmental Pollution*, 194, 121-129. DOI: 10.1016/j.envpol.2014.07.021.

Vijayaraghavan, K., Joshi, U.M., Balasubramanian, R.

2012. A field study to evaluate runoff quality from green roofs. *Water Research*, 46(4), 1337-1345. DOI: 10.1016/j.watres.2011.12.050.

Vijayaraghavan, K., Raja, F.D.

2014. Design and development of green roof substrate to improve runoff water quality: Plant growth experiments and adsorption. *Water Research*, 63, 94-101. DOI: 10.1016/j.watres.2014.06.012.

Vilches, T.C.

2020. Estudio sobre Confinamiento por COVID-19, vivienda y habitabilidad: [COVID-HAB]. Comparecencia ante el Ayuntamiento de Madrid en la mesa sobre vivienda. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc-CSIC).

Villarreal, E.L., Bengtsson, L.

2005. Response of a *Sedum* green-roof to individual rain events. *Ecological Engineering*, 25(1), 1-7. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2004.11.008.

Villarreal, E.L., Semadeni-Davies, A., Bengtsson, L.

2004. Inner city stormwater control using a combination of best management practices. *Ecological Engineering*, 22(4-5), 279-298. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2004.06.007.

Vox, G., Blanco, I., Schettini, E.

2018. Green façades to control wall surface temperature in buildings. *Building and Environment*, 129, 154-166. DOI: 10.1016/j.buildenv.2017.12.002.

Vox, G., Maneta, A., Schettini, E.

2016. Evaluation of the radiometric properties of roofing materials for livestock buildings and their effect on the surface temperature. *Biosystems Engineering*, 144, 26-37. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2016.01.016.



Walters, S.A., Midden, K.S.

2018. Sustainability of urban agriculture: Vegetable production on green roofs. *Agriculture*, 8(11), 168. DOI: 10.3390/agriculture8110168.

Westbank Campus.

2022. Energy Hub. <https://westbankcampus.com/energy-hub>. Acceso: 18/11/2021.

Wolf, D., Lundholm, J.T.

2008. Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological Engineering*, 33(2), 179-186. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.02.008.

Wong, N.H., Chen, Y., Ong, C.L., Sia, A.

2003. Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. *Building and Environment*, 38(2), 261-270. DOI: 10.1016/S0360-1323(02)00066-5.

Wong, N.H., Cheong, D.K.W., Yan, H., Soh, J., Ong, C.L., Sia, A.

2003. The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings*, 35(4), 353-364. DOI: 10.1016/S0378-7788(02)00108-1.

Yang, H.S., Kang, J., Choi, M.S.

2012. Acoustic effects of green roof systems on a low-profiled structure at street level. *Building and Environment*, 50, 44-55. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.10.004.

Yang, J., Kumar, D.I.M., Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M, Kolokotsa, D., Lee, S.E.

2018. Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 173, 597-609. DOI: 10.1016/j.solener.2018.08.006.

Yang, W., Wang, Z., Zhao, X.

2015. Experimental investigation of the thermal isolation and evaporative cooling effects of an exposed shallow-water-reserved roof under the sub-tropical climatic condition. *Sustainable Cities and Society*, 14, 293-304. DOI: 10.1016/j.scs.2014.10.003.

Yazdani, H., Baneshi, M.

2021. Building energy comparison for dynamic cool roofs and green roofs under various climates. *Solar Energy*, 230, 764-778. DOI: 10.1016/j.solener.2021.10.076.

Zhang, H., Fan, X., Ren, L., Jiang, Y., Wu, J., Zhao, H.

2021. Crassulacean plant succession over eight years on an unirrigated green roof in Beijing. *Urban Forestry and Urban Greening*, 63, 127189. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127189.

Zhang, H., Lu, S., Fan, X., Wu, J., Jiang, Y., Ren, L., Wu, J., Zhao, H.

2021. Is sustainable extensive green roof realizable without irrigation in a temperate monsoonal climate? A case study in Beijing. *Science of the Total Environment*, 753, 142067. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142067.

Zheng, X., Yang, Z., Yang, J., Tang, M., Feng, C.

2022. An experimental study on the thermal and energy performance of self-sustaining green roofs under severe drought conditions in summer. *Energy and Buildings*, 261, 111953. DOI: 10.1016/j.enbuild.2022.111953.

Zimmermann, A.

2015. Elements. Vegetated Roofing. Capítulo del libro: *Planning landscape: dimensions, elements, typologies*, 211-217. Ed.: Birkhäuser.

ZinCo Cubiertas Ecológicas.

2021a. Guía de planificación: Sistemas para cubiertas verdes extensivas. [https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-12/ZinCo\\_Cubiertas\\_Verdes\\_Extensivas\\_0.pdf](https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-12/ZinCo_Cubiertas_Verdes_Extensivas_0.pdf). Acceso: 25/05/2022.

2021b. Guía de planificación: Sistemas para cubiertas verdes inclinadas. [https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-07/ZinCo\\_Cubiertas\\_verdes\\_inclinadas.pdf](https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-07/ZinCo_Cubiertas_verdes_inclinadas.pdf). Acceso: 13/04/2020.



- 2021c. Guía de planificación: Energía solar y cubiertas verdes. [https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-08/Energia\\_solar\\_cubiertas\\_ecologicas.pdf](https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-08/Energia_solar_cubiertas_ecologicas.pdf). Acceso: 16/07/2020.
- 2021d. Ficha técnica Zincoterra “Floral”.
- 2021e. Ficha técnica Zincoterra “Jardín”.
- 2021f. Floradrain FD 40-E.
- 2021g. Mezcla mineral “Zincolit Plus”.
- 2021h. Gama de productos Zinco. [https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-12/ZinCo\\_Gama\\_de\\_Productos.pdf](https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-12/ZinCo_Gama_de_Productos.pdf). Acceso: 14/12/2022.
- 2021i. Guía de planificación: Fallnet - Sistemas de protección anticaída en cubiertas planas. [https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-01/ZinCo\\_Fallnet.pdf](https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2021-01/ZinCo_Fallnet.pdf). Acceso: 29/09/2022.
- 2021j. Guía de planificación: Sistema ZinCo para cubiertas verdes. [https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2022-11/ZinCo\\_Sistemas\\_Cubiertas\\_Verdes\\_0.pdf](https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/sites/default/files/2022-11/ZinCo_Sistemas_Cubiertas_Verdes_0.pdf). Acceso: 29/09/2022.
- 2021k. Ficha técnica Fieltro de distribución de agua AF 300.
- 2021l. Ficha técnica Floraset FS 75.

#### Zinzi, M., Agnoli, S.

2012. Cool and green roofs. An energy and comfort comparison between passive cooling and mitigation urban heat island techniques for residential buildings in the Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 55, 66-76. DOI: 10.1016/j.enbuild.2011.09.024.

#### Ziougou, I., Michopoulos, A. Voulgari, V., Zachariadis, T.

2017. Energy, environmental and economic assessment of electricity savings from the operation of green roofs in urban office buildings of a warm Mediterranean region. *Journal of Cleaner Production*, 168, 346-356. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.08.217.
2019. Jardines en el tejado de las favelas de Brasil. *El Mundo*. <https://www.elmundo.es/internacional/2019/12/15/5df52be8fd-dffbf0e8b458c.html>. Acceso: 28/12/2022.



**ANEXOS**





## ANEXO I. ESTUDIO DE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA, EL PESO PROPIO Y EL COSTE

### I.1 DETALLES CONSTRUCTIVOS DE LOS MODELOS

En primer lugar, se describen gráficamente los 16 modelos a estudiar. Se trata de un modelo de referencia con acabado de grava (no ajardinado), cinco modelos ajardinados con capa drenante de paneles nodulares plásticos (extensiva-semiintensiva-intensiva-sin vegetación), cinco modelos ajardinados con capa drenante de materiales granulares (extensiva-semiintensiva-intensiva-sin vegetación), un modelo de cubierta aljibe y cuatro modelos de *polder roof* (extensiva-semiintensiva). En la Figura I.1 se puede observar cada sistema constructivo, el nombre de las capas y una breve descripción de cada modelo.

La información para determinar las especificaciones indicadas en las tablas sucesivas se ha obtenido de diferentes fuentes bibliográficas. Para facilitar la comprensión se listan a continuación una serie de referencias numeradas con superíndices. Estos se añadirán junto a la información que corresponda en todas las tablas incluidas en este Anexo I.

<sup>1</sup> Véase apartado 4.1.10.

<sup>2</sup> AENOR. 2009.

<sup>3</sup> Ministerio de Vivienda. 2010.

<sup>4</sup> Fundació de la Jardineria i el Paisatge. 2012.

<sup>5</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021d.

<sup>6</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021f.

<sup>7</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021e.

<sup>8</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021g.

<sup>9</sup> Paradela, M.L.S. 2020d.

<sup>10</sup> DANOSA España. 2021a.

<sup>11</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021h.

<sup>12</sup> Materiales Navarro. 2010.

<sup>13</sup> Ortiz, L.L. 2018.

<sup>14</sup> Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. 2020a.

<sup>15</sup> Machado, M.V., Britto, C., Neila, J. 2003.

<sup>16</sup> Enciclopedia Concepto. 2022.

<sup>17</sup> DANOSA España. 2021b.

<sup>18</sup> Ministerio de Fomento. 2009.

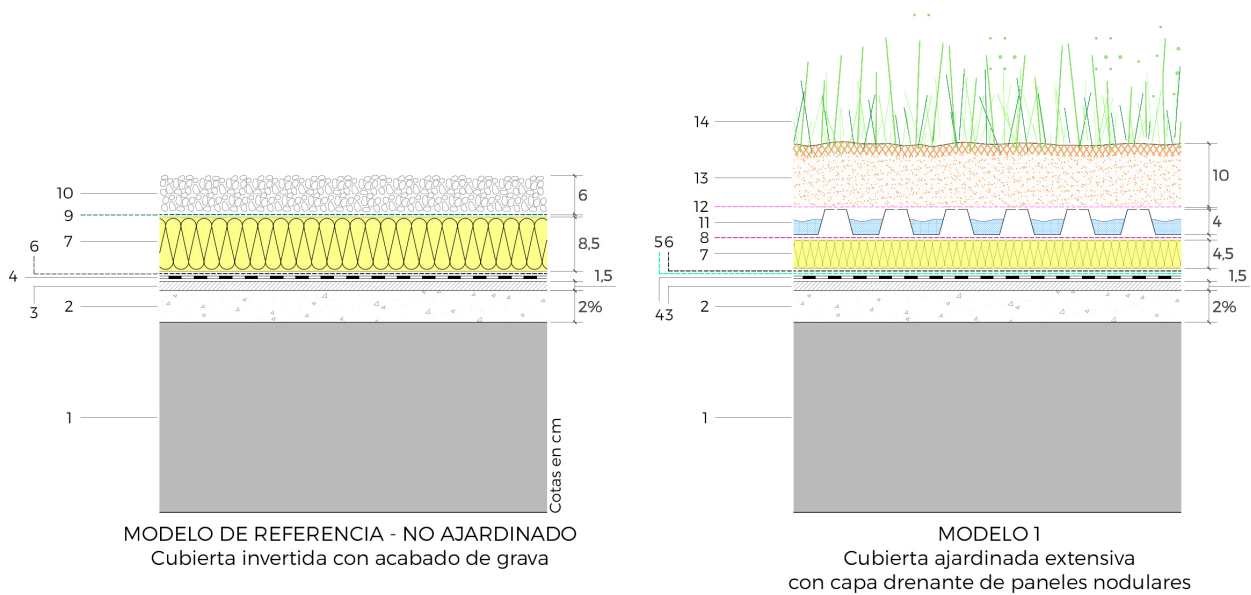
<sup>19</sup> DANOSA España. 2021c.

<sup>20</sup> CYPE Ingenieros. 2022.

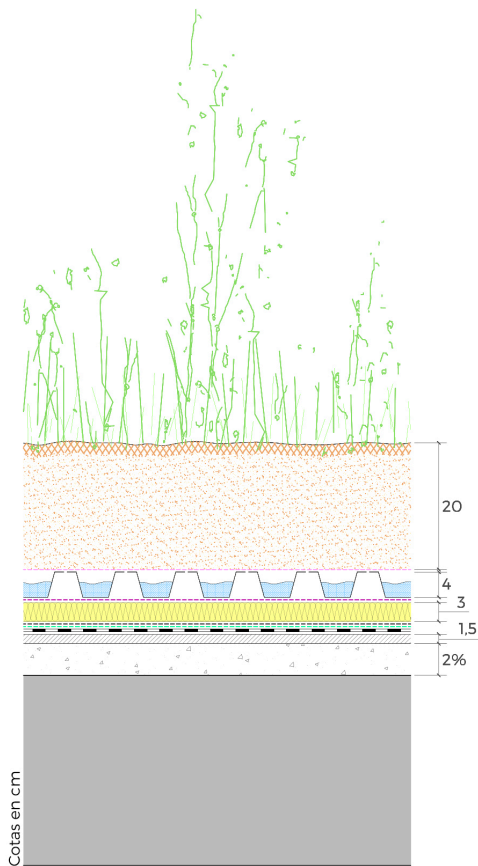
<sup>21</sup> DANOSA España. 2020.



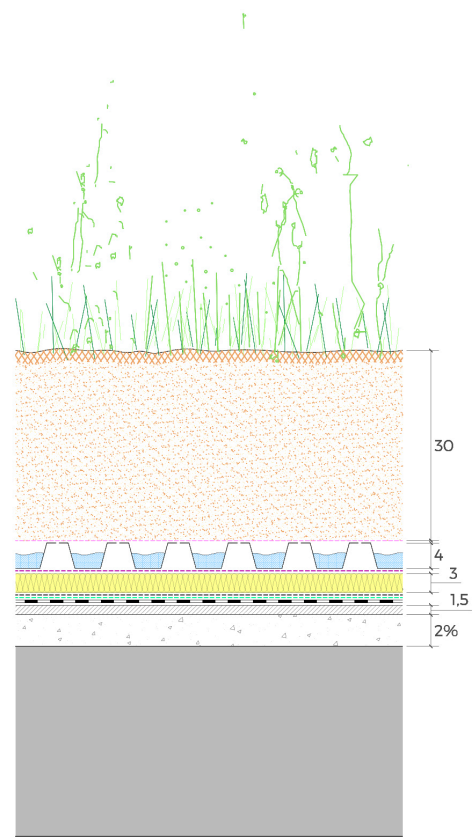
- 1 Estructura soporte
- 2 Hormigón ligero para formación de pendientes
- 3 Mortero de regulación
- 4 Lámina impermeable- EPDM no adherida
- 5 Lámina antiraíces
- 6 Capa separadora por incompatibilidad química + antiadherente
- 7 Material aislante térmico XPS
- 8 Capa difusora de vapor + incompatibilidad química + antiadherente
- 9 Capa separadora antipunzonante + filtrante
- 10 Terminación no ajardinada (grava)
- 11 Capa drenante (paneles nodulares de materiales plásticos)
- 12 Lámina filtrante
- 13 Substrato
- 14 Vegetación
- 15 Capa difusora de vapor + antipunzonante
- 16 Capa drenante (materiales granulares)
- 17 Barrera de vapor
- 18 Capa de agua
- 19 Depósito para retención de agua
- 20 Filtro absorbente
- 21 Losa filtrante sobre plots regulables en altura



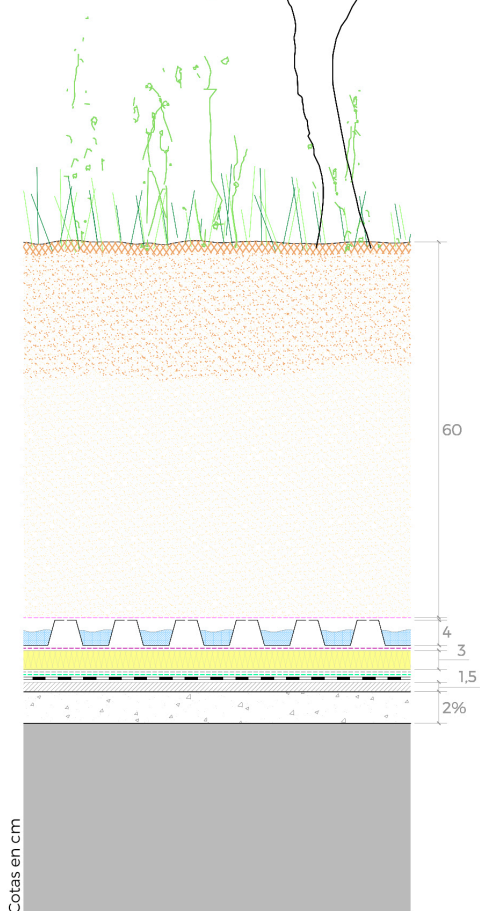




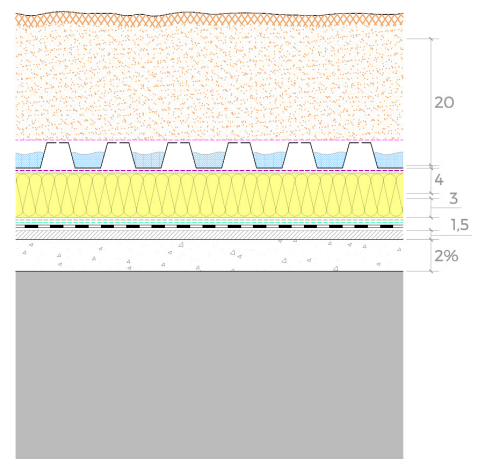
MODELO 2  
Cubierta ajardinada semiintensiva (de poco espesor)  
con capa drenante de paneles nodulares



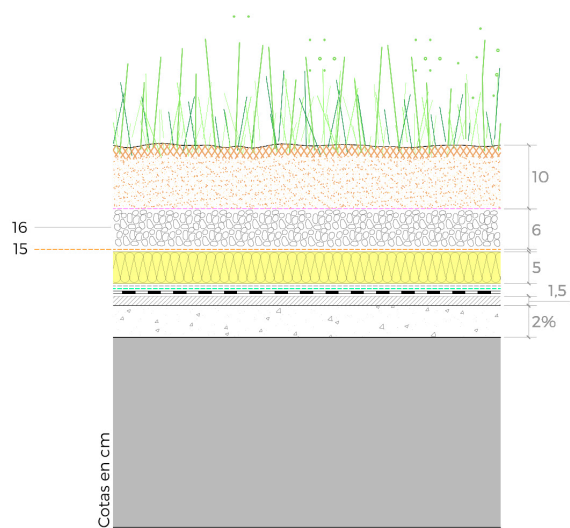
MODELO 3  
Cubierta ajardinada semiintensiva (máximo espesor)  
con capa drenante de paneles nodulares



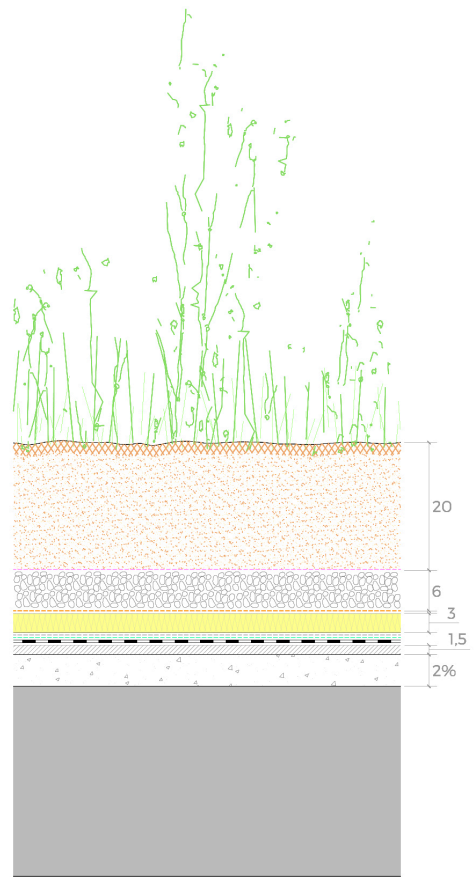
MODELO 4  
Cubierta ajardinada intensiva  
con capa drenante de paneles nodulares



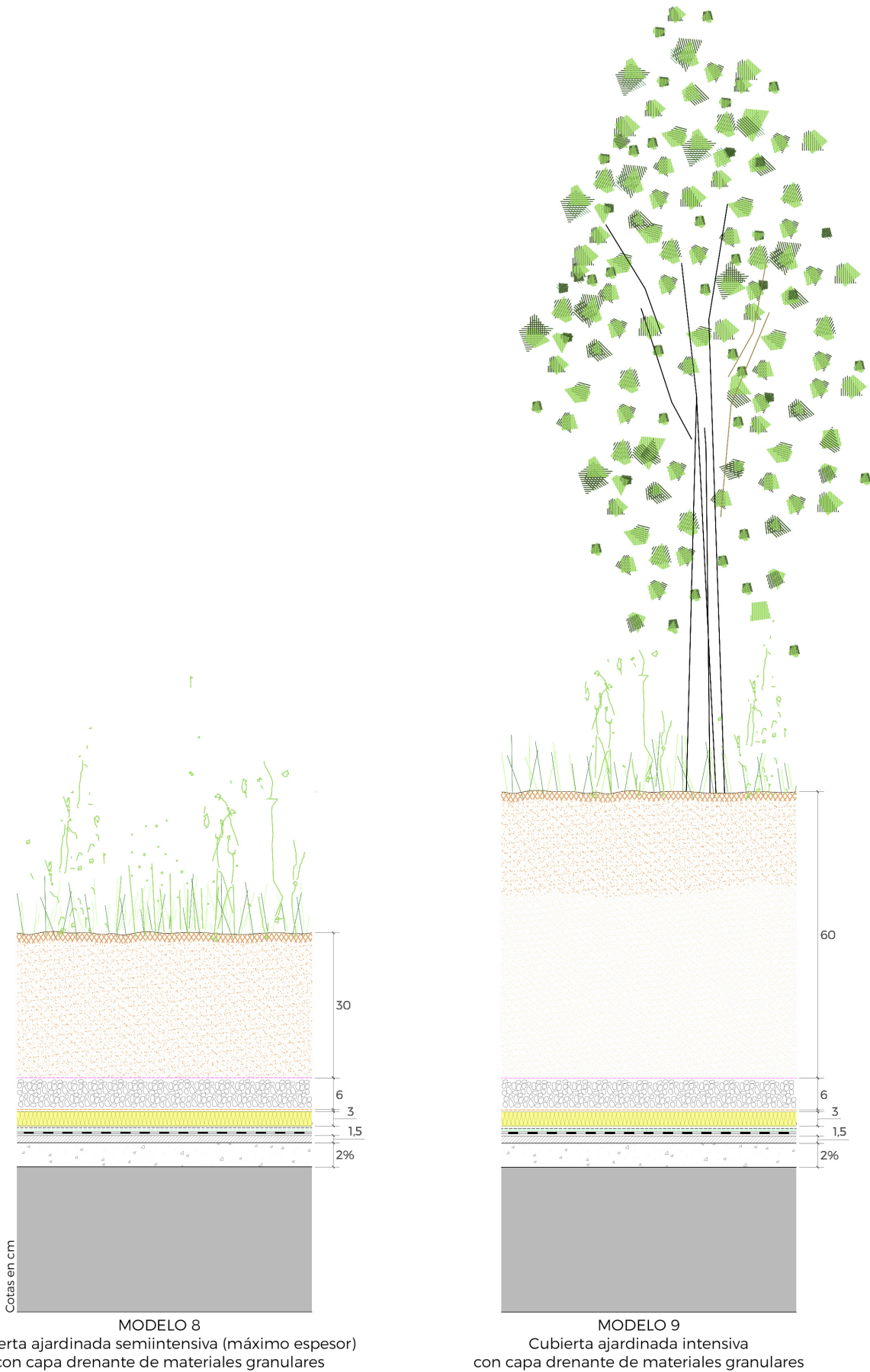
MODELO 5  
Cubierta ajardinada semiintensiva (de poco espesor)  
con capa drenante de paneles nodulares, sin vegetación

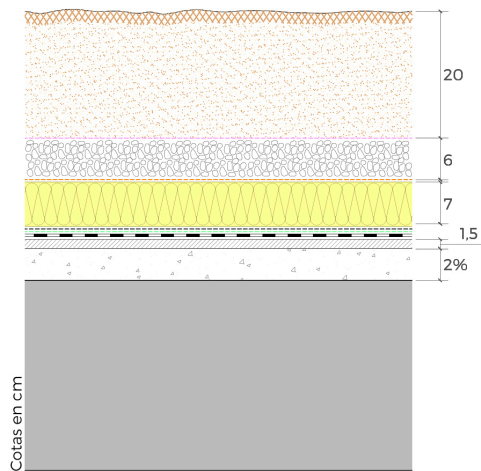


MODELO 6  
Cubierta ajardinada extensiva  
con capa drenante de materiales granulares

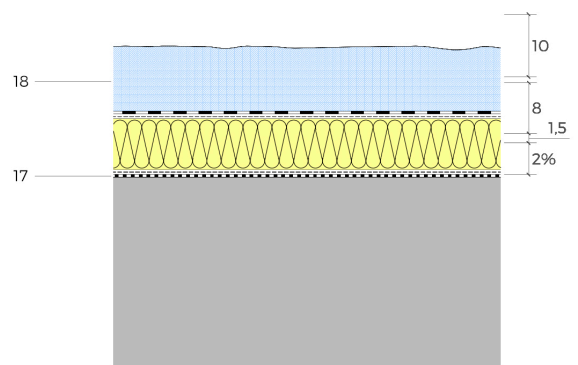


MODELO 7  
Cubierta ajardinada semiintensiva (de poco espesor)  
con capa drenante de materiales granulares

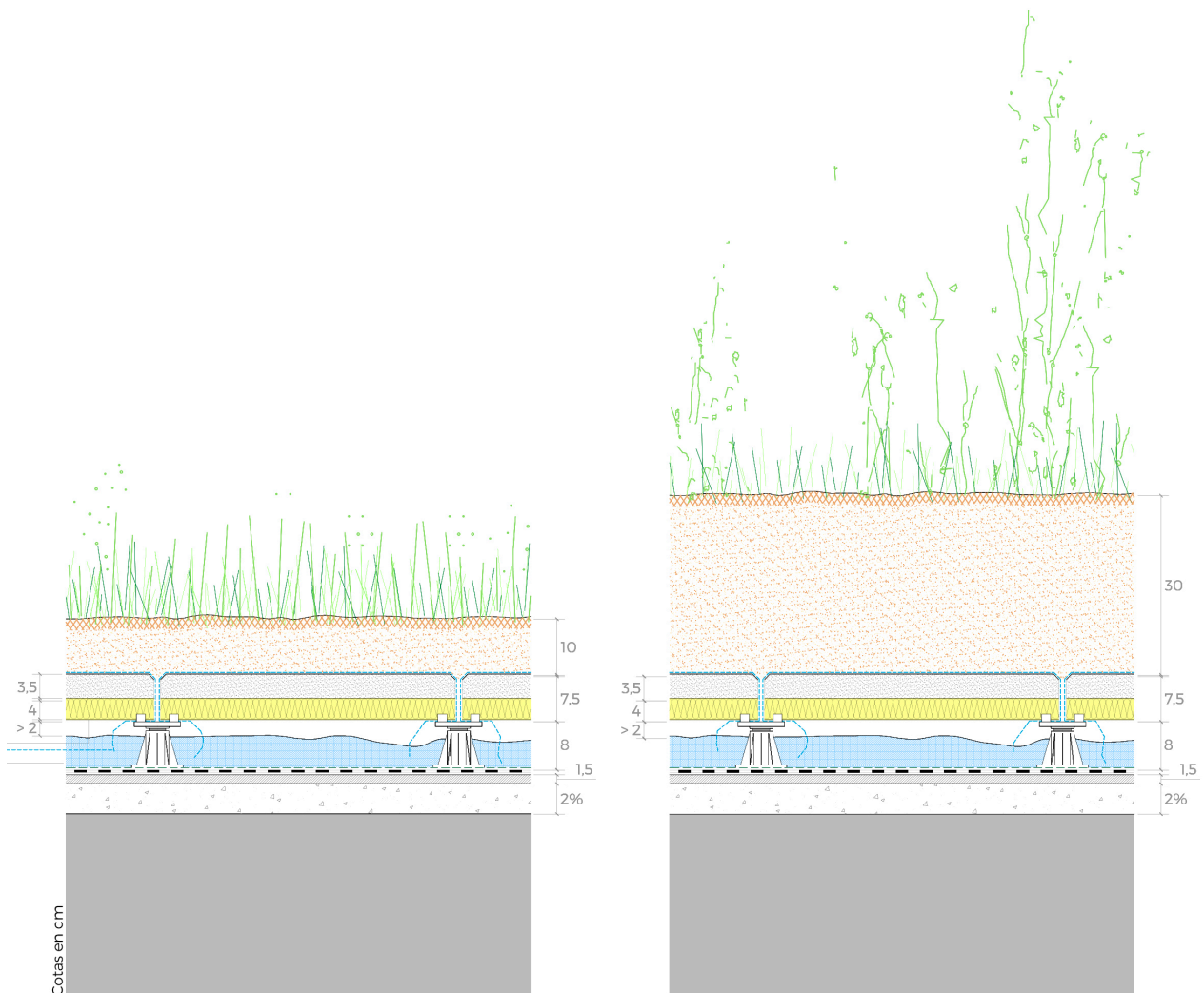




MODELO 10  
Cubierta ajardinada semiintensiva (de poco espesor)  
con capa drenante de materiales granulares, sin vegetación



MODELO 11  
Cubierta aljibe



Cotas en cm

MODELO 12  
Polder roof con ajardinamiento extensivo  
y capa de almacenamiento de agua de 8 cm

MODELO 13  
Polder roof con ajardinamiento semiintensivo  
y capa de almacenamiento de agua de 8 cm

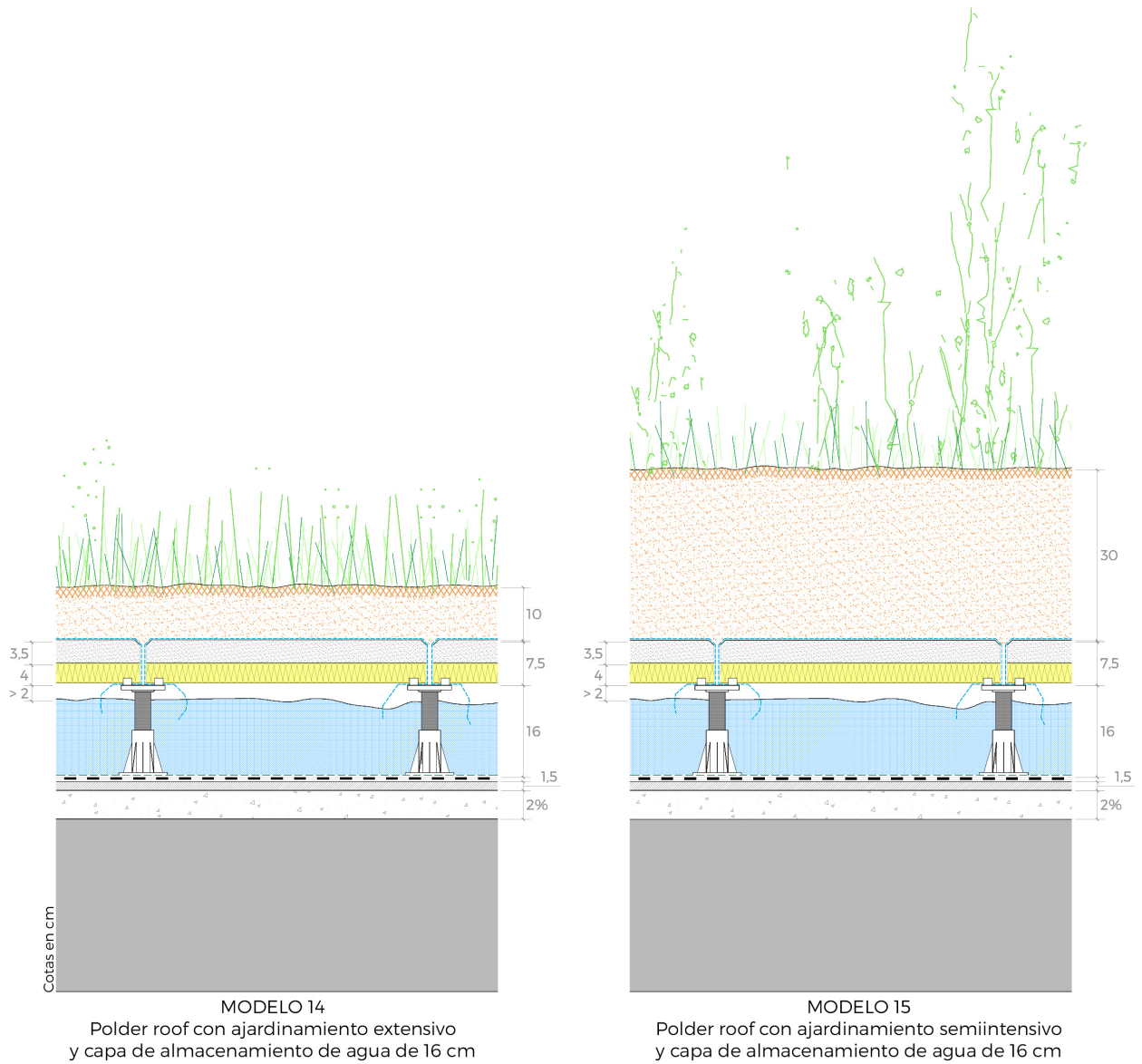


Figura I.1. Sistema constructivo y breve descripción de los 16 modelos a estudiar.



Se detallan a continuación más especificaciones de las diferentes capas empleadas en los diferentes modelos (Tabla I.1, I.2, I.3, I.4, I.5, I.6, I.7, I.8, I.9, I.10, I.11, I.12, I.13 y I.14).

MODELO DE REFERENCIA – NO AJARDINADO	
Grava	Grava, tamaño Ø 16-32 mm
Capa antipunzonante + filtrante	Filtro de poliéster de masa $\geq 200 \text{ gr/m}^2$ (P 200) <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28 \text{ m}^3$
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>

Tabla I.1. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo de referencia.

MODELO 1	
Vegetación	Especies suculentas, herbáceas y cespitosas (altura $h < 150 \text{ mm}$ ) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>5</sup>
Lámina filtrante	Filtro sintético con masa $\geq 300 \text{ gr/m}^2$ y permeabilidad $\geq 15 \text{ mm/s}$ (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Paneles nodulares de poliolefina (principalmente PE), con capacidad de retención de agua de $5 \text{ L/m}^2$ <sup>6</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	Filtro de polipropileno con masa $\geq 100 \text{ gr/m}^2$ (PP 100). Se instalan dos unidades de $120 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Filtro de polietileno con masa $\geq 320 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28 \text{ m}^3$
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>

Tabla I.2. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 1.





MODELO 2-3	
Vegetación	Especies cespitosas, herbáceas y vivaces (altura $h \sim 150$ mm) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Lámina filtrante	Filtro sintético con masa $\geq 300$ gr/m <sup>2</sup> y permeabilidad $\geq 15$ mm/s (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Paneles nodulares de poliolefina (principalmente PE), con capacidad de retención de agua de 5 L/m <sup>2</sup> <sup>6</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	Filtro de polipropileno con masa $\geq 100$ gr/m <sup>2</sup> (PP 100). Se instalan dos unidades de 120 gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120$ gr/m <sup>2</sup> (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Filtro de polietileno con masa $\geq 320$ gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>

Tabla I.3. Características de las diferentes capas del sistema constructivo de los modelos 2 y 3.

MODELO 4	
Vegetación	Especies arbustivas de porte mediano (altura $h = 1-3$ m) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Lámina filtrante	Filtro sintético con masa $\geq 300$ gr/m <sup>2</sup> y permeabilidad $\geq 15$ mm/s (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Paneles nodulares de poliolefina (principalmente PE), con capacidad de retención de agua de 5 L/m <sup>2</sup> <sup>6</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	Filtro de polipropileno con masa $\geq 100$ gr/m <sup>2</sup> (PP 100). Se instalan dos unidades de 120 gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120$ gr/m <sup>2</sup> (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Filtro de polietileno con masa $\geq 320$ gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>

Tabla I.4. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 4.



MODELO 5	
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Lámina filtrante	Fieltro sintético con masa $\geq 300 \text{ gr/m}^2$ y permeabilidad $\geq 15 \text{ mm/s}$ (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Paneles nodulares de poliolefina (principalmente PE), con capacidad de retención de agua de $5 \text{ L/m}^2$ <sup>6</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	Fieltro de polipropileno con masa $\geq 100 \text{ gr/m}^2$ (PP 100). Se instalan dos unidades de $120 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Fieltro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Fieltro de polietileno con masa $\geq 320 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 $\text{N/m}^2$ - con densidad $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28 \text{ m}^3$
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>

Tabla I.5. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 5.

MODELO 6	
Vegetación	Especies suculentas, herbáceas y cespitosas (altura $h < 150 \text{ mm}$ ) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>5</sup>
Lámina filtrante	Fieltro sintético con masa $\geq 300 \text{ gr/m}^2$ y permeabilidad $\geq 15 \text{ mm/s}$ (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Mezcla mineral de áridos, con capacidad de retención de agua de $16,8 \text{ L/m}^2$ <sup>8</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	Fieltro de polipropileno con masa $\geq 100 \text{ gr/m}^2$ (PP 100) – Fieltro sintético con resistencia a punzonamiento $\geq 50 \text{ kg}$ (FS 50 A). Se instala dos fieltros de masa total $320 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Fieltro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Fieltro de polietileno con masa $\geq 320 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 $\text{N/m}^2$ - con densidad $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28 \text{ m}^3$
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>

Tabla I.6. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 6.



MODELO 7-8	
Vegetación	Especies cespitosas, herbáceas y vivaces (altura $h \sim 150$ mm) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Lámina filtrante	Filtro sintético con masa $\geq 300$ gr/m <sup>2</sup> y permeabilidad $\geq 15$ mm/s (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Mezcla mineral de áridos, con capacidad de retención de agua de 16,8 L/m <sup>2</sup> <sup>8</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	Filtro de polipropileno con masa $\geq 100$ gr/m <sup>2</sup> (PP 100) – Filtro sintético con resistencia a punzonamiento $\geq 50$ kg (FS 50 A). Se instala dos filtros de masa total 320 gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120$ gr/m <sup>2</sup> (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Filtro de polietileno con masa $\geq 320$ gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>

Tabla I.7. Características de las diferentes capas del sistema constructivo de los modelos 7 y 8.

MODELO 9	
Vegetación	Especies arbustivas de porte mediano (altura $h = 1-3$ m) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Lámina filtrante	Filtro sintético con masa $\geq 300$ gr/m <sup>2</sup> y permeabilidad $\geq 15$ mm/s (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Mezcla mineral de áridos, con capacidad de retención de agua de 16,8 L/m <sup>2</sup> <sup>8</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	Filtro de polipropileno con masa $\geq 100$ gr/m <sup>2</sup> (PP 100) – Filtro sintético con resistencia a punzonamiento $\geq 50$ kg (FS 50 A). Se instala dos filtros de masa total 320 gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120$ gr/m <sup>2</sup> (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Filtro de polietileno con masa $\geq 320$ gr/m <sup>2</sup> <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>

Tabla I.8. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 9.



MODELO 10	
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Lámina filtrante	Filtro sintético con masa $\geq 300 \text{ gr/m}^2$ y permeabilidad $\geq 15 \text{ mm/s}$ (FS 15) <sup>1</sup>
Capa drenante	Mezcla mineral de áridos, con capacidad de retención de agua de $16,8 \text{ L/m}^2$ <sup>8</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	Filtro de polipropileno con masa $\geq 100 \text{ gr/m}^2$ (PP 100) – Filtro sintético con resistencia a punzonamiento $\geq 50 \text{ kg}$ (FS 50 A). Se instala dos filtros de masa total $320 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	Filtro de polietileno con masa $\geq 320 \text{ gr/m}^2$ <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 $\text{N/m}^2$ - con densidad $\rho = 1900 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28 \text{ m}^3$
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>

Tabla I.9. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 10.

MODELO 11	
Capa de agua	Espesor mínimo de $10 \text{ cm}$ <sup>9</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Capa separación química + antiadherente	Filtro de fibra de vidrio compacto con masa $\geq 120 \text{ gr/m}^2$ (FFV 1/120) <sup>1</sup>
Barrera de vapor	Lámina asfáltica de betún modificado (LBM) con acabado de film plástico en ambas caras <sup>10</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28 \text{ m}^3$
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000 \text{ kg/m}^3$ <sup>3</sup>

Tabla I.10. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 11.



MODELO 12	
Vegetación	Especies suculentas, herbáceas y cespitosas (altura $h < 150$ mm) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>5</sup>
Filtro absorbente	Filtro sintético con capacidad de retención de agua de 12 L/m <sup>2</sup> y masa de 1500 kg/m <sup>2</sup> <sup>11</sup>
Hormigón HPAP	Hormigón Poroso de Altas Prestaciones (HPAP), para losa filtrante <sup>12</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Cámara de aire	Sin ventilar, horizontal, espesor 2 cm <sup>13</sup>
Capa de agua	Aljibe de 8 cm, pero entre agua y losa filtrante se recomienda que queden 2 cm (útil de almacenamiento = 6 cm) <sup>13</sup>
Capa antipunzonante	Filtro de poliéster con masa $\geq 200$ gr/m <sup>2</sup> (P 200) <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>

Tabla I.11. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 12.

MODELO 13	
Vegetación	Especies cespitosas, herbáceas y vivaces (altura $h \sim 150$ mm) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Filtro absorbente	Filtro sintético con capacidad de retención de agua de 12 L/m <sup>2</sup> y masa de 1500 kg/m <sup>2</sup> <sup>11</sup>
Hormigón HPAP	Hormigón Poroso de Altas Prestaciones (HPAP), para losa filtrante <sup>12</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Cámara de aire	Sin ventilar, horizontal, espesor 2 cm <sup>13</sup>
Capa de agua	Aljibe de 8 cm, pero entre agua y losa filtrante se recomienda que queden 2 cm (útil de almacenamiento = 6 cm) <sup>13</sup>
Capa antipunzonante	Filtro de poliéster con masa $\geq 200$ gr/m <sup>2</sup> (P 200) <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>3</sup>

Tabla I.12. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 13.



MODELO 14	
Vegetación	Especies suculentas, herbáceas y cespitosas (altura $h < 150$ mm) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>5</sup>
Filtro absorbente	Filtro sintético con capacidad de retención de agua de 12 L/m <sup>2</sup> y masa de 1500 kg/m <sup>2</sup> <sup>11</sup>
Hormigón HPAP	Hormigón Poroso de Altas Prestaciones (HPAP), para losa filtrante <sup>12</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Cámara de aire	Sin ventilar, horizontal, espesor 2 cm <sup>13</sup>
Capa de agua	Aljibe de 16 cm, pero entre agua y losa filtrante se recomienda que queden 2 cm (útil de almacenamiento = 14 cm) <sup>13</sup>
Capa antipunzonante	Filtro de poliéster con masa $\geq 200$ gr/m <sup>2</sup> (P 200) <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>33</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>33</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>33</sup>

Tabla I.13. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 14.

MODELO 15	
Vegetación	Especies cespitosas, herbáceas y vivaces (altura $h \sim 150$ mm) <sup>4</sup>
Substrato	Mezcla de cerámica y otros componentes minerales, mezclados con compost y turba rubia <sup>7</sup>
Filtro absorbente	Filtro sintético con capacidad de retención de agua de 12 L/m <sup>2</sup> y masa de 1500 kg/m <sup>2</sup> <sup>11</sup>
Hormigón HPAP	Hormigón Poroso de Altas Prestaciones (HPAP), para losa filtrante <sup>12</sup>
Material Aislante	Poliestireno extruido (XPS)
Cámara de aire	Sin ventilar, horizontal, espesor 2 cm <sup>13</sup>
Capa de agua	Aljibe de 16 cm, pero entre agua y losa filtrante se recomienda que queden 2 cm (útil de almacenamiento = 14 cm) <sup>13</sup>
Capa antipunzonante	Filtro de poliéster con masa $\geq 200$ gr/m <sup>2</sup> (P 200) <sup>1</sup>
Lámina impermeable	Lámina EPDM, colocación monocapa no adherida <sup>2</sup>
Mortero de regulación	Mortero M-5 N/m <sup>2</sup> - con densidad $\rho = 1900$ kg/m <sup>3</sup> <sup>33</sup>
Formación de pendientes	Hormigón con áridos ligeros, $1800 \leq \rho \leq 2000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>33</sup>
Estructura de soporte	Forjado con piezas de entrevigado cerámicas, luces de hasta 5 m y grueso total $< 0,28$ m <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	Guarnecido y enlucido de yeso, $\rho \leq 1000$ kg/m <sup>3</sup> <sup>33</sup>

Tabla I.14. Características de las diferentes capas del sistema constructivo del modelo 15.



## I.2 TRANSMITANCIA TÉRMICA

A continuación, se detallan los cálculos de la resistencia térmica (R) y transmitancia térmica (U) de los 16 modelos estudiados (Tabla I.15, I.16, I.17, I.18, I.19, I.20, I.21, I.22, I.23, I.24, I.25, I.26, I.27, I.28, I.29 y I.30). La información relacionada con la conductividad y resistencia de los materiales o las capas de aire del sistema de cubierta se han obtenido de la normativa vigente, de artículos consultados en referencia al cálculo de la conductividad térmica en cubierta ajardinadas y de otras fuentes de información consultadas. En todos los casos la transmitancia es igual o se encuentra por debajo del valor U límite ( $U_c$ ) indicada por el anejo E del CTE DB-HE para zona climática B (València)<sup>1</sup>,  $U_c=0,33$  m<sup>2</sup>K/W.

MODELO DE REFERENCIA – NO AJARDINADO			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub> *			0,040 <sup>14</sup>
Grava	0,060	2,000 <sup>3</sup>	0,030
Capa antipunzonante + filtrante	0,001		
Material aislante	0,085	0,033 <sup>3</sup>	2,576
Capa separación química + antiadherente	0,0012		
Lámina impermeable	0,001	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub> *			0,100 <sup>14</sup>
		<b>R<sub>TOTAL</sub></b>	<b>3,154</b>
		<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>	<b>0,317</b>

\* Resistencia superficial de las capas de aire exterior (R<sub>se</sub>) e interior (R<sub>si</sub>) de la cubierta.

Tabla I.15. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo de referencia.



MODELO 1			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,100	0,120* <sup>15</sup>	0,833
Substrato	0,100	0,520* <sup>3</sup>	0,192
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,040	0,330 <sup>3</sup>	0,121
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		
Material aislante	0,045	0,033 <sup>3</sup>	1,364
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,058</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,327</b>

\* La conductividad térmica equivalente de la capa de vegetación y substrato, de acuerdo con Machado *et al.*, es de 0,120 W/mK. Este valor es una simplificación. En el caso del substrato, de acuerdo con el Catálogo de Elementos Constructivos, la conductividad de la tierra vegetal es de 0,520 W/mK. Para estar del lado de la seguridad tomamos este valor para el substrato, mientras que, para la vegetación tomamos el de 0,120 W/mK al no disponer de información más detallada para el cálculo teórico manual.

Tabla I.16. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 1.





MODELO 2			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,200	0,120 <sup>15</sup>	1,667
Substrato	0,200	0,520 <sup>3</sup>	0,385
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,040	0,330 <sup>3</sup>	0,121
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		
Material aislante	0,030	0,033 <sup>3</sup>	0,909
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,629</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,276</b>

Tabla I.17. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 2.

MODELO 3			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,400	0,120 <sup>15</sup>	3,333
Substrato	0,300	0,520 <sup>3</sup>	0,577
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,040	0,330 <sup>3</sup>	0,121
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		
Material aislante	0,030	0,033 <sup>3</sup>	0,909
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>5,488</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,182</b>

Tabla I.18. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 3.



MODELO 4			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,600	0,120 <sup>15</sup>	5,000
Substrato	0,600	0,520 <sup>3</sup>	1,154
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,040	0,330 <sup>3</sup>	0,121
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		
Material aislante	0,030	0,033 <sup>3</sup>	0,909
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>7,732</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,129</b>

Tabla I.19. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 4.

MODELO 5			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Substrato	0,200	0,520 <sup>3</sup>	0,385
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,040	0,330 <sup>3</sup>	0,121
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		
Material aislante	0,070	0,033 <sup>3</sup>	2,121
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,175</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,315</b>

Tabla I.20. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 5.



MODELO 6			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,100	0,120 <sup>15</sup>	0,833
Substrato	0,100	0,520 <sup>3</sup>	0,192
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,060	2,000 <sup>3</sup>	0,030
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		
Material aislante	0,050	0,033 <sup>3</sup>	1,515
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,119</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,321</b>

Tabla I.21. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 6.

MODELO 7			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,200	0,120 <sup>15</sup>	1,667
Substrato	0,200	0,520 <sup>3</sup>	0,385
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,060	2,000 <sup>3</sup>	0,030
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		
Material aislante	0,030	0,033 <sup>3</sup>	0,909
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,538</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,283</b>

Tabla I.22. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 7.



MODELO 8			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,400	0,120 <sup>15</sup>	3,333
Substrato	0,300	0,520 <sup>3</sup>	0,577
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,060	2,000 <sup>3</sup>	0,030
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		
Material aislante	0,030	0,033 <sup>3</sup>	0,909
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>5,397</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,185</b>

Tabla I.23. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 8.

MODELO 9			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,600	0,120 <sup>15</sup>	5,000
Substrato	0,600	0,520 <sup>3</sup>	1,154
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,060	2,000 <sup>3</sup>	0,030
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		
Material aislante	0,030	0,033 <sup>3</sup>	0,909
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>7,641</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,131</b>

Tabla I.24. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 9.



MODELO 10			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Substrato	0,200	0,520 <sup>3</sup>	0,385
Lámina filtrante	0,001		
Capa drenante	0,060	2,000 <sup>3</sup>	0,030
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		
Material aislante	0,070	0,033 <sup>3</sup>	2,121
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Lámina antiraíces	0,004		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,084</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,324</b>

Tabla I.25. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 10.

MODELO 11			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Capa de agua	0,100	0,580 <sup>16</sup>	0,172
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Material aislante	0,080	0,033 <sup>3</sup>	2,424
Capa separación química + antiadherente	0,001		
Barrera de vapor	0,0002	0,330 <sup>3</sup>	0,001
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,060</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,327</b>

Tabla I.26. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 11.



MODELO 12			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,100	0,120 <sup>15</sup>	0,833
Substrato	0,100	0,520 <sup>3</sup>	0,192
Filtro absorbente	0,017		
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones <sup>A</sup>	0,035		1,282 <sup>12</sup>
Material aislante <sup>A</sup>	0,040		
Cámara de aire <sup>B</sup>	0,020		0,160 <sup>14</sup>
Capa de agua <sup>B</sup>	0,060	0,580 <sup>16</sup>	0,103
Capa antipunzonante	0,001		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,119</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,321</b>

<sup>A</sup> El Hormigón Poroso de Altas Prestaciones (HPAP) y el material aislante conforman la losa filtrante sobre plots regulables en altura. En este caso el valor de su resistencia se da para el conjunto de la losa.

<sup>B</sup> La cámara de aire y la capa de agua conforman el depósito para retención de agua.

Tabla I.27. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 12.

MODELO 13			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,400	0,120 <sup>15</sup>	3,333
Substrato	0,300	0,520 <sup>3</sup>	0,577
Filtro absorbente	0,017		
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		1,282 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040		
Cámara de aire	0,020		0,160 <sup>14</sup>
Capa de agua	0,060	0,580 <sup>16</sup>	0,103
Capa antipunzonante	0,001		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>6,004</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,167</b>

Tabla I.28. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 13.



MODELO 14			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,100	0,120 <sup>15</sup>	0,833
Substrato	0,100	0,520 <sup>3</sup>	0,192
Filtro absorbente	0,017		
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		1,282 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040		
Cámara de aire	0,020		0,160 <sup>14</sup>
Capa de agua	0,140	0,580 <sup>16</sup>	0,241
Capa antipunzonante	0,001		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>3,257</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,307</b>

Tabla I.29. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 14.

MODELO 15			
Capas	e (m)	$\lambda$ (W/mK)	R (m <sup>2</sup> K/W)
R <sub>se</sub>			0,040 <sup>14</sup>
Vegetación	0,400	0,120 <sup>15</sup>	3,333
Substrato	0,300	0,520 <sup>3</sup>	0,577
Filtro absorbente	0,017		
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		1,282 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040		
Cámara de aire	0,020		0,160 <sup>14</sup>
Capa de agua	0,140	0,580 <sup>16</sup>	0,241
Capa antipunzonante	0,001		
Lámina impermeable	0,0012	0,250 <sup>3</sup>	0,005
Mortero de regulación	0,015	1,300 <sup>3</sup>	0,012
Formación de pendiente	0,100	1,350 <sup>3</sup>	0,074
Estructura soporte	0,250		0,280 <sup>3</sup>
Enlucido de yeso	0,015	0,400 <sup>3</sup>	0,038 <sup>3</sup>
R <sub>si</sub>			0,100 <sup>14</sup>
<b>R<sub>TOTAL</sub></b>			<b>6,142</b>
<b>U<sub>TOTAL</sub> (W/m<sup>2</sup>K)</b>			<b>0,163</b>

Tabla I.30. Cálculo de la transmitancia térmica del modelo 15.



### I.3 PESO PROPIO

En el siguiente apartado se detalla el peso específico ( $\gamma$ ), en caso de ser necesario, y la carga de peso propio ( $P$ ) de cada una de las capas y la suma total del sistema constructivo (Tabla I.31, I.32, I.33, I.34, I.35, I.36, I.37, I.38, I.39, I.40, I.41, I.42, I.43, I.44, I.45 y I.46). También se indica la carga de peso propio aportado por la lámina impermeable y las capas superiores ( $P_1$ ), considerando que la estructura soporte, el sistema de revestimiento interior y la formación de pendientes con el mortero de regulación están en buen estado. Por lo tanto, en una rehabilitación en la que estas capas estuvieran en buen estado se mantendrían, y se añadirían únicamente las capas situadas por encima del mortero de regulación (véase apartado 6.1.1).

Para obtener los datos necesarios para realizar este estudio se ha consultado las normativas vigentes, normas técnicas de aplicación recomendada y fichas técnicas de los diferentes materiales. Todos los cálculos realizados en este apartado son considerando una situación de saturación de la cubierta. Esto afecta especialmente a las capas con capacidad de almacenamiento de agua (substrato, capa drenante y fieltro absorbente).

MODELO DE REFERENCIA – NO AJARDINADO				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )*
Grava	0,060		1,080 <sup>4</sup>	108,00
Capa antipunzonante + filtrante	0,001		0,002	0,20 <sup>1</sup>
Material aislante	0,085	0,320 <sup>17</sup>	0,027	2,72
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
			<b>P<sub>TOTAL</sub></b>	<b>655,94</b>
			<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>	<b>112,44</b>

\* Las unidades de la carga de peso propio son daN/m<sup>2</sup>. Se trata de una unidad de medida equivalente a kg/m<sup>2</sup>, pero en la cual la aceleración de la gravedad, para el paso de unidades de N a kg, se ha simplificado de 9,81 m/s<sup>2</sup> a 10 m/s<sup>2</sup>.

Tabla I.31. Cálculo de la carga de peso propio del modelo de referencia.





MODELO 1				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100		0,100 <sup>4</sup>	10,00
Substrato	0,100	14,000 <sup>5</sup>	1,400	140,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,040		0,069* <sup>26</sup>	6,90
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		0,002	0,24 <sup>1</sup>
Material aislante	0,045	0,320 <sup>17</sup>	0,014	1,44
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>704,20</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>160,70</b>

\* El P de la capa drenante es de 0,019 kN/m<sup>2</sup>. Al considerar situación de saturación se deben sumar 0,05 kN/m<sup>2</sup> (capacidad de retención de agua 5 L/m<sup>2</sup>, siendo el  $\gamma$  del agua 10 kN/m<sup>3</sup>). El P de la capa drenante en situación de saturación es de 0,069 kN/m<sup>2</sup>.

Tabla I.32. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 1.

MODELO 2				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,200		0,150 <sup>4</sup>	15,00
Substrato	0,200	15,000 <sup>7</sup>	3,000	300,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,040		0,069 <sup>26</sup>	6,90
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		0,002	0,24 <sup>1</sup>
Material aislante	0,030	0,320 <sup>17</sup>	0,010	0,96
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>868,72</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>325,22</b>

Tabla I.33. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 2.



MODELO 3				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400		0,150 <sup>4</sup>	15,00
Substrato	0,300	15,000 <sup>7</sup>	4,500	450,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,040		0,069 <sup>26</sup>	6,90
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		0,002	0,24 <sup>1</sup>
Material aislante	0,030	0,320 <sup>17</sup>	0,010	0,96
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>1018,72</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>475,22</b>

Tabla I.34. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 3.

MODELO 4				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,600		0,200 <sup>4</sup>	20,00
Substrato	0,600	15,000 <sup>7</sup>	9,000	900,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,040		0,069 <sup>26</sup>	6,90
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		0,002	0,24 <sup>1</sup>
Material aislante	0,030	0,320 <sup>17</sup>	0,010	0,96
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>1473,72</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>930,22</b>

Tabla I.35. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 4.



MODELO 5				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Substrato	0,200	15,000 <sup>7</sup>	3,000	300,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,040		0,069 <sup>26</sup>	6,90
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002		0,002	0,24 <sup>1</sup>
Material aislante	0,070	0,320 <sup>17</sup>	0,022	2,24
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>855,00</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>311,50</b>

Tabla I.36. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 5.

MODELO 6				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100		0,100 <sup>4</sup>	10,00
Substrato	0,100	14,000 <sup>5</sup>	1,400	140,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,060	13,000 <sup>28</sup>	0,780	78,00
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		0,003	0,32 <sup>1</sup>
Material aislante	0,050	0,320 <sup>17</sup>	0,016	1,60
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>775,54</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>232,04</b>

Tabla I.37. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 6.



MODELO 7				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,200		0,150 <sup>4</sup>	15,00
Substrato	0,200	15,000 <sup>7</sup>	3,000	300,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,060	13,000 <sup>28</sup>	0,780	78,00
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		0,003	0,32 <sup>1</sup>
Material aislante	0,030	0,320 <sup>17</sup>	0,010	0,96
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>939,90</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>396,40</b>

Tabla I.38. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 7.

MODELO 8				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400		0,150 <sup>4</sup>	15,00
Substrato	0,300	15,000 <sup>7</sup>	4,500	450,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,060	13,000 <sup>28</sup>	0,780	78,00
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		0,003	0,32 <sup>1</sup>
Material aislante	0,030	0,320 <sup>17</sup>	0,010	0,96
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>1089,90</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>546,40</b>

Tabla I.39. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 8.



MODELO 9				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,600		0,200 <sup>4</sup>	20,00
Substrato	0,600	15,000 <sup>7</sup>	9,000	900,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,060	13,000 <sup>28</sup>	0,780	78,00
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		0,003	0,32 <sup>1</sup>
Material aislante	0,030	0,320 <sup>17</sup>	0,010	0,96
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
			<b>P<sub>TOTAL</sub></b>	<b>1544,90</b>
			<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>	<b>1001,40</b>

Tabla I.40. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 9.

MODELO 10				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Substrato	0,200	15,000 <sup>7</sup>	3,000	300,00
Lámina filtrante	0,001		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Capa drenante	0,060	13,000 <sup>28</sup>	0,780	78,00
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002		0,003	0,32 <sup>1</sup>
Material aislante	0,070	0,320 <sup>17</sup>	0,022	2,24
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Lámina antiraíces	0,004		0,003	0,30 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
			<b>P<sub>TOTAL</sub></b>	<b>926,18</b>
			<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>	<b>382,68</b>

Tabla I.41. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 10.



MODELO 11				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Capa de agua	0,100	10,000	1,000	100,00
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Material aislante	0,080	0,320 <sup>17</sup>	0,026	2,56
Capa separación química + antiadherente	0,001		0,001	0,12 <sup>1</sup>
Barrera de vapor	0,0002		0,030	3,00 <sup>10</sup>
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>422,20</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>107,20*</b>

\* En este caso el P<sub>1</sub> hace referencia a la carga de peso propio de la barrera de vapor y las capas superiores.

Tabla I.42. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 11.

MODELO 12				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100		0,100 <sup>4</sup>	10,00
Substrato	0,100	14,000 <sup>5</sup>	1,400	140,00
Filtro absorbente	0,017		0,135* <sup>11</sup>	13,50
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		0,700	70,00 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040			
Cámara de aire	0,020			
Capa de agua	0,060	10,000	0,600	60,00
Capa antipunzonante	0,001		0,002	0,20 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>838,60</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>295,10</b>

\* El P del filtro absorbente es de 0,015 kN/m<sup>2</sup>. Al considerar situación de saturación se deben sumar 0,12 kN/m<sup>2</sup> (capacidad de retención de agua 12 L/m<sup>2</sup>, siendo el  $\gamma$  del agua 10 kN/m<sup>3</sup>). El P del filtro absorbente en situación de saturación es de 0,135 kN/m<sup>2</sup>.

Tabla I.43. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 12.



MODELO 13				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400		0,150 <sup>4</sup>	15,00
Substrato	0,300	15,000 <sup>7</sup>	4,500	450,00
Filtro absorbente	0,017		0,135 <sup>11</sup>	13,50
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		0,700	70,00 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040			
Cámara de aire	0,020			
Capa de agua	0,060	10,000	0,600	60,00
Capa antipunzonante	0,001		0,002	0,20 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>1153,60</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>610,10</b>

Tabla I.44. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 13.

MODELO 14				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100		0,100 <sup>4</sup>	10,00
Substrato	0,100	14,000 <sup>5</sup>	1,400	140,00
Filtro absorbente	0,017		0,135 <sup>11</sup>	13,50
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		0,700	70,00 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040			
Cámara de aire	0,020			
Capa de agua	0,140	10,000	1,400	140,00
Capa antipunzonante	0,001		0,002	0,20 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,0012		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>918,60</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>375,10</b>

Tabla I.45. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 14.

MODELO 15				
Capas	e (m)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	P (kN/m <sup>2</sup> )	P (daN/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400		0,150 <sup>4</sup>	15,00
Substrato	0,300	15,000 <sup>7</sup>	4,500	450,00
Filtro absorbente	0,017		0,135 <sup>11</sup>	13,50
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035		0,700	70,00 <sup>12</sup>
Material aislante	0,040			
Cámara de aire	0,020			
Capa de agua	0,140	10,000	1,400	140,00
Capa antipunzonante	0,001		0,002	0,20 <sup>1</sup>
Lámina impermeable	0,001		0,014	1,40 <sup>19</sup>
Mortero de regulación	0,015	19,000 <sup>18</sup>	0,285	28,50
Formación de pendiente	0,100	20,000 <sup>18</sup>	2,000	200,00
Estructura soporte	0,250		3,000 <sup>18</sup>	300,00
Enlucido de yeso	0,015		0,150 <sup>18</sup>	15,00
<b>P<sub>TOTAL</sub></b>				<b>1233,60</b>
<b>P<sub>1TOTAL</sub></b>				<b>690,10</b>

Tabla I.46. Cálculo de la carga de peso propio del modelo 15.





### I.4 COSTE DE CONSTRUCCIÓN

Por último, se detalla el coste de construcción (C) de cada una de las capas y el total del sistema constructivo (Tabla I.47, I.48, I.49, I.50, I.51, I.52, I.53, I.54, I.55, I.56, I.57, I.58, I.59, I.60, I.61 y I.62). Se consideran tanto el coste del material como la mano de obra. Para la obtención de los datos necesarios se ha consultado la base de datos del generador de precios de la construcción de CYPE Ingenieros, las tarifas de precios de las empresas suministradoras de los productos utilizados y se han mantenido conversaciones con el personal de estas empresas encargado de las ventas. Al igual que en el caso de la carga de peso propio, se valora el coste de construcción derivado de instalar solo la lámina impermeable y las capas superiores (C<sub>1</sub>). Se considera que las capas inferiores pueden encontrarse en buen estado y mantenerse durante la rehabilitación.

MODELO DE REFERENCIA – NO AJARDINADO		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Grava	0,060	6,68 <sup>20</sup>
Capa antipunzonante + filtrante	0,001	2,16 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,085	8,81 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>124,80</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>41,33</b>

Tabla I.47. Cálculo del coste de construcción del modelo de referencia.

MODELO 1		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100	18,63 <sup>20</sup>
Substrato	0,100	14,19* <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,040	11,88 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002	2,99 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,045	5,78 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>169,70</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>86,23</b>

\* El coste por m<sup>3</sup> de los distintos tipos de substrato se obtienen de conversaciones con la empresa suministrante, ZinCo Cubiertas Ecológicas. El substrato Zincoterra “Floral” tiene un coste de 49,50 €/m<sup>3</sup>.

Tabla I.48. Cálculo del coste de construcción del modelo 1.



MODELO 2		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,200	23,97 <sup>20</sup>
Substrato	0,200	34,23* <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,040	11,88 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002	2,99 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,030	4,91 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>194,21</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>110,74</b>

\* El coste por m<sup>3</sup> de los distintos tipos de substrato se obtienen de conversaciones con la empresa suministrante, ZinCo Cubiertas Ecológicas. El substrato Zincoterra "Jardín" tiene un coste de 54,00 €/m<sup>3</sup>.

Tabla 1.49. Cálculo del coste de construcción del modelo 2.

MODELO 3		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400	34,95 <sup>20</sup>
Substrato	0,300	51,35 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,040	11,88 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002	2,99 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,030	4,91 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>222,31</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>138,84</b>

Tabla 1.50. Cálculo del coste de construcción del modelo 3.



MODELO 4		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,600	47,10 <sup>20</sup>
Substrato	0,600	102,69 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,040	11,88 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002	2,99 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,030	4,91 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>285,80</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>202,33</b>

Tabla I.51. Cálculo del coste de construcción del modelo 4.

MODELO 5		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Substrato	0,200	34,23 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,040	11,88 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + separación química + antiadherente	0,002	2,99 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,070	7,51 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>172,84</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>89,37</b>

Tabla I.52. Cálculo del coste de construcción del modelo 5.



MODELO 6		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100	18,63 <sup>20</sup>
Substrato	0,100	14,19 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,060	6,68 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002	2,77 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,050	6,21 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>164,71</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>81,24</b>

Tabla I.53. Cálculo del coste de construcción del modelo 6.

MODELO 7		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,200	23,97 <sup>20</sup>
Substrato	0,200	34,23 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,060	6,68 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002	2,77 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,030	4,91 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>188,79</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>105,32</b>

Tabla I.54. Cálculo del coste de construcción del modelo 7.



MODELO 8		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400	34,95 <sup>20</sup>
Substrato	0,300	51,35 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,060	6,68 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002	2,77 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,030	4,91 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>216,89</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>133,42</b>

Tabla I.55. Cálculo del coste de construcción del modelo 8.

MODELO 9		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,600	47,10 <sup>20</sup>
Substrato	0,600	102,69 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,060	6,68 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002	2,77 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,030	4,91 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>280,38</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>196,91</b>

Tabla I.56. Cálculo del coste de construcción del modelo 9.



MODELO 10		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Substrato	0,200	34,23 <sup>20</sup>
Lámina filtrante	0,001	2,63 <sup>20 21</sup>
Capa drenante	0,060	6,68 <sup>20</sup>
Capa difusora de vapor + antipunzonante	0,002	2,77 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,070	7,94 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Lámina antiraíces	0,004	6,45 <sup>20</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>167,85</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>84,38</b>

Tabla I.57. Cálculo del coste de construcción del modelo 10.

MODELO 11		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Capa de agua	0,100	1,15
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Material aislante	0,080	8,81 <sup>20</sup>
Capa separación química + antiadherente	0,001	2,38 <sup>20 21</sup>
Barrera de vapor	0,0002	7,57 <sup>20 21</sup>
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>100,78</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>43,59*</b>

\* En este caso el C<sub>1</sub> hace referencia al coste de construcción de la barrera de vapor y capas superiores.

Tabla I.58. Cálculo del coste de construcción del modelo 11.



MODELO 12		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100	18,63 <sup>20</sup>
Substrato	0,100	14,19 <sup>20</sup>
Filtro absorbente	0,017	12,89* <sup>20</sup>
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035	35,96 <sup>20</sup>
Material aislante	0,040	
Cámara de aire	0,020	
Capa de agua	0,060	0,89
Capa antipunzonante	0,001	2,16 <sup>20 21</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>189,49</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>106,02</b>

\* El coste por m<sup>2</sup> de los distintos tipos de substrato se obtienen de conversaciones con la empresa suministrante, ZinCo Cubiertas Ecológicas. El filtro absorbente WSM 150 tiene un coste de 11,55 €/m<sup>2</sup>.

Tabla I.59. Cálculo del coste de construcción del modelo 12.

MODELO 13		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400	34,95 <sup>20</sup>
Substrato	0,300	51,35 <sup>20</sup>
Filtro absorbente	0,017	12,89 <sup>20</sup>
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035	35,96 <sup>20</sup>
Material aislante	0,040	
Cámara de aire	0,020	
Capa de agua	0,060	0,89
Capa antipunzonante	0,001	2,16 <sup>20 21</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>242,97</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>159,50</b>

Tabla I.60. Cálculo del coste de construcción del modelo 13.



MODELO 14		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,100	18,63 <sup>20</sup>
Substrato	0,100	14,19 <sup>20</sup>
Filtro absorbente	0,017	12,89 <sup>20</sup>
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035	35,96 <sup>20</sup>
Material aislante	0,040	
Cámara de aire	0,020	
Capa de agua	0,140	1,41
Capa antipunzonante	0,001	2,16 <sup>20 21</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>190,01</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>106,54</b>

Tabla I.61. Cálculo del coste de construcción del modelo 14.

MODELO 15		
Capas	e (m)	C (€/m <sup>2</sup> )
Vegetación	0,400	34,95 <sup>20</sup>
Substrato	0,300	51,35 <sup>20</sup>
Filtro absorbente	0,017	12,89 <sup>20</sup>
Hormigón Poroso de Altas Prestaciones	0,035	35,96 <sup>20</sup>
Material aislante	0,040	
Cámara de aire	0,020	
Capa de agua	0,140	1,41
Capa antipunzonante	0,001	2,16 <sup>20 21</sup>
Lámina impermeable	0,0012	21,30 <sup>20 21</sup>
Mortero de regulación	0,015	26,28 <sup>20</sup>
Formación de pendiente	0,100	
Estructura soporte	0,250	48,75 <sup>20</sup>
Enlucido de yeso	0,015	8,44 <sup>20</sup>
<b>C<sub>TOTAL</sub></b>		<b>243,49</b>
<b>C<sub>1 TOTAL</sub></b>		<b>160,02</b>

Tabla I.62. Cálculo del coste de construcción del modelo 15.





## ANEXO II. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS METEOROLÓGICOS

### II.1 TEMPERATURA

Los datos que se emplean en este apartado y sucesivos se han obtenido de la estación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) en el Campus de Vera de la UPV.

En la tabla II.1 se recogen las temperaturas medias por meses desde 2001 hasta el final del periodo de estudio de las maquetas, en 2022. En la última columna se indica la temperatura media mensual durante el año de estudio de las maquetas ( $AÑO_M$ ), que engloba desde junio de 2021 hasta mayo de 2022.

Las temperaturas medias mensuales ( $\mu$ ) para todo el periodo de 2001 a 2022 se recogen en la tabla II.2, junto a la desviación estándar ( $\sigma$ ). Se indican los límites superiores e inferiores del rango establecido de acuerdo con el teorema de Chebychev, considerando el valor de  $k$  como el mínimo para una distribución de datos no normal (1,5). Por último, se vuelven a mostrar las temperaturas medias para cada uno de los meses del año de estudio de las maquetas, comprobando que quedan, en cada caso, dentro de los límites del rango.

### II.2 HUMEDAD RELATIVA

Respecto a la humedad relativa, en la tabla II.3 se recogen las humedades relativas medias por meses desde 2010 hasta el final del periodo de estudio de las maquetas, en 2022. En la última columna se indica la humedad relativa media mensual durante el año de estudio de las maquetas ( $AÑO_M$ ), que engloba desde junio de 2021 hasta mayo de 2022.

Las humedades relativas medias mensuales ( $\mu$ ) para todo el periodo de 2010 a 2022 se recogen en la tabla II.4, junto a la desviación estándar ( $\sigma$ ). Se indican los límites superiores e inferiores del rango establecido de acuerdo con el teorema de Chebychev, considerando el valor de  $k=2$ . Por último, se vuelven a mostrar las humedades relativas medias para cada uno de los meses del año de estudio de las maquetas, comprobando que quedan, en cada caso, dentro de los límites del rango.

### II.3 PRECIPITACIONES

Para el estudio de las precipitaciones se realiza, en primer lugar, la tabla II.5. En ella se recogen las precipitaciones acumuladas por meses desde 2010 hasta el final del periodo de estudio de las maquetas, en 2022. En la última fila se indica las precipitaciones totales anuales. Para los años 2010 y 2022, por no estar completos, no se calculan las precipitaciones acumuladas de todo el año. En la última columna se indican las precipitaciones acumuladas mensuales durante el año de estudio de las maquetas ( $AÑO_M$ ), que engloba desde junio de 2021 hasta mayo de 2022, así como las precipitaciones anuales totales durante ese año.

Las precipitaciones totales medias ( $\mu$ ) para todo el periodo de 2010 a 2022 se recogen en la tabla II.6, junto a la desviación estándar ( $\sigma$ ). Se indican los límites superiores e inferiores del rango establecido de acuerdo con el teorema de Chebychev, considerando el valor de  $k=2$ . Por último, se vuelven a mostrar las precipitaciones acumuladas totales para el año de estudio de las maquetas, comprobando que quedan dentro de los límites del rango.



TEMPERATURA (°C)										
MES	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Enero	14,1	12,1	12,3	14,3	10,3	10,5	12,2	13,2	11,6	11,0
Febrero	13,3	14,3	11,4	11,9	9,8	11,6	14,9	13,2	12,1	11,9
Marzo	19,0	15,3	14,2	13,2	13,5	16,5	15,1	15,6	13,7	13,1
Abril	17,7	16,4	16,6	15,7	16,6	17,4	16,3	17,6	16,0	15,9
Mayo	20,0	18,5	19,6	18,4	19,9	20,1	21,0	18,8	20,0	18,9
Junio	24,0	23,7	26,3	24,2	24,8	22,8	23,5	22,2	24,1	22,4
Julio	25,9	25,2	27,9	25,9	26,3	26,9	25,2	25,5	26,2	26,4
Agosto	27,3	25,0	28,1	27,9	25,5	25,5	25,5	26,4	26,6	26,5
Septiembre	23,4	23,8	23,9	24,6	23,1	24,0	22,9	23,4	23,0	23,5
Octubre	21,5	20,6	19,6	21,3	20,0	21,9	19,2	18,8	21,0	18,7
Noviembre	13,5	16,7	16,1	14,6	14,1	17,3	13,9	14,0	17,8	14,9
Diciembre	10,7	14,7	13,0	12,2	11,8	12,6	12,7	11,3	12,9	11,3

Tabla II.1. Temperatura mensual media (°C) desde 2001 hasta 2022, incluido el año de estudio de las maquetas.

	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO	
Media (°C)	12,2		12,6		14,5		16,4		19,5	
Desviación est. (°C)	1,4		1,4		1,4		1,0		0,9	
Teorema Chebychev (°C)	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
	10,2	14,2	10,5	14,8	12,4	16,7	14,9	17,9	18,2	20,9
Año <sub>M</sub> (°C)	10,4		12,8		12,8		15,2		19,7	

Tabla II.2. Temperatura mensual media (°C) para el periodo de 2001 a 2022, desviación estándar, límites inferiores y superiores del rango según el teorema de Chebychev con  $k=1,5$  y temperatura media mensual durante el año de estudio de las maquetas.

HUMEDAD RELATIVA (%)						
MES	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Enero	-	67,1	67,8	53,7	61,8	57,9
Febrero	-	59,2	51,4	54,0	57,1	55,6
Marzo	-	70,8	65,8	61,2	64,8	65,0
Abril	-	74,3	62,5	68,2	68,2	70,0
Mayo	-	75,6	69,0	66,4	67,3	62,0
Junio	68,8	79,0	76,0	69,8	71,1	67,8
Julio	74,9	74,9	78,0	73,5	70,3	75,2
Agosto	72,3	76,8	78,1	76,5	74,9	71,2
Septiembre	72,9	74,4	68,5	73,3	72,8	68,8
Octubre	65,9	69,7	72,1	68,5	68,5	74,2
Noviembre	59,3	77,4	71,7	54,3	67,4	67,6
Diciembre	63,3	63,2	62,8	66,1	60,5	77,5

Tabla II.3. Humedad relativa mensual media (%) desde 2010 hasta 2022, incluido el año de estudio de las maquetas.



TEMPERATURA (°C)												
2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	AÑO <sub>M</sub>
11,5	12,5	13,7	13,9	12,5	14,3	11,1	13,6	11,1	10,8	11,0	10,4	10,4
13,2	9,7	12,7	14,0	12,3	14,4	13,8	10,9	11,8	13,9	13,9	12,8	12,8
13,4	13,7	15,8	14,5	15,0	14,8	15,0	15,1	14,1	13,9	12,8	12,8	12,8
17,5	16,8	15,6	18,5	16,5	17,0	15,9	16,8	15,3	15,7	14,2	15,2	15,2
20,3	20,3	18,1	19,5	21,0	19,2	20,3	19,4	18,1	20,3	18,2	19,7	19,7
22,5	24,3	22,1	23,1	23,8	22,8	24,8	23,5	21,8	22,4	22,5	-	22,5
25,3	25,7	26,0	25,0	27,6	25,8	26,0	26,6	25,8	25,5	24,9	-	24,9
26,3	27,3	25,7	26,7	26,9	25,6	26,0	27,2	25,9	26,1	25,5	-	25,5
24,3	23,6	24,1	25,5	23,1	24,0	23,4	24,5	23,2	23,0	23,5	-	23,5
20,6	20,7	22,6	22,5	19,8	21,0	20,8	19,1	19,8	18,6	19,4	-	19,4
16,2	15,9	15,9	16,9	16,6	15,2	15,0	15,1	15,6	15,3	14,2	-	14,2
13,6	13,6	12,1	12,8	14,1	13,2	12,5	13,8	13,8	12,5	13,9	-	13,9

JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE	
23,4		26,0		26,4		23,7		20,4		15,5		12,8	
1,1		0,8		0,8		0,7		1,2		1,2		1,0	
Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
21,7	25,1	24,8	27,2	25,1	27,6	22,7	24,7	18,6	22,2	13,7	17,3	11,3	14,3
22,5		24,9		25,5		23,5		19,4		14,2		13,9	

HUMEDAD RELATIVA (%)							
2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	AÑO <sub>M</sub>
62,0	66,4	65,9	61,3	79,2	67,8	70,7	70,7
55,7	70,2	66,7	69,1	77,4	77,0	73,5	73,5
58,6	69,3	56,6	64,7	75,5	80,3	79,4	79,4
65,9	74,4	69,2	69,1	81,2	81,4	72,2	72,2
68,9	72,6	74,9	71,8	76,5	80,1	79,6	79,6
71,6	73,4	74,6	73,2	79,0	78,5	-	78,5
74,2	78,3	78,7	77,9	82,4	81,1	-	81,1
74,5	79,2	77,9	79,9	79,2	82,3	-	82,3
68,8	73,2	82,3	77,7	72,9	82,3	-	82,3
76,6	78,3	75,0	73,4	67,0	79,9	-	79,9
68,0	58,9	75,6	59,5	84,6	67,5	-	67,5
78,6	61,5	72,6	73,3	67,0	72,2	-	72,2



	ENERO		FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO	
Media (%)	65,1		63,9		67,7		71,4		72,0	
Desviación est. (%)	6,5		9,4		7,7		5,7		5,5	
Teorema Chebychev (%)	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
	52,1	78,2	45,0	82,8	52,3	83,0	60,0	82,8	61,0	83,1
Año <sub>M</sub> (%)	70,7		73,5		79,4		72,2		79,6	

Tabla II.4. Humedad relativa mensual media (%) para el periodo de 2010 a 2022, desviación estándar, límites inferiores y superiores del rango según el teorema de Chebychev con k=2 y humedad relativa mensual durante el año de estudio de las maquetas.

PRECIPITACIONES (mm)						
MES	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Enero	-	10,3	52,1	5,4	5,9	9,4
Febrero	-	2,5	0,3	42,4	11,2	3,9
Marzo	-	62,5	31,8	53,2	29,8	80,0
Abril	-	55,1	23,1	72,0	7,7	0,0
Mayo	-	8,2	0,6	11,5	9,1	0,0
Junio	18,6	1,0	0,9	9,1	12,8	2,7
Julio	1,3	11,2	1,0	2,8	25,5	7,9
Agosto	12,5	7,2	0,0	36,5	0,1	14,7
Septiembre	58,8	32,2	35,8	0,0	41,4	81,7
Octubre	79,3	8,7	46,0	9,4	0,3	57,4
Noviembre	24,6	105,8	60,3	9,8	49,6	31,9
Diciembre	17,6	7,7	6,7	12,5	34,1	1,8
<b>ANUAL</b>	-	<b>312,4</b>	<b>258,6</b>	<b>264,6</b>	<b>227,5</b>	<b>291,4</b>

Tabla II.5. Precipitaciones totales mensuales y anuales (mm) desde 2010 hasta 2022, incluido el año de estudio de las maquetas.

	ANUAL	
Media (mm)	321,9	
Desviación est. (mm)	118,8	
Teorema de Chebychev (mm)	Inf.	Sup.
	84,4	559,5
Año <sub>M</sub> (mm)	539,5	

Tabla II.6. Precipitaciones totales medias (mm) para el periodo de 2010 a 2022, desviación estándar, límites inferiores y superiores del rango según el teorema de Chebychev con k=2 y precipitaciones totales durante el año de estudio de las maquetas.



JUNIO		JULIO		AGOSTO		SEPTIEMBRE		OCTUBRE		NOVIEMBRE		DICIEMBRE	
73,6		76,6		76,9		74,0		72,4		67,6		68,2	
3,9		3,4		3,2		4,7		4,6		8,8		6,3	
Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.
65,7	81,4	69,8	83,4	70,4	83,4	64,6	83,3	63,3	81,6	50,0	85,3	55,5	80,9
78,5		81,1		82,3		82,3		79,9		67,5		72,2	

PRECIPITACIONES (mm)							
2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	AÑO <sub>M</sub>
1,3	115,2	15,7	1,5	69,7	22,2	9,4	9,4
3,2	10,6	47,9	1,3	0,9	11,8	3,3	3,3
4,6	42,8	22,4	15,5	2,1	44,7	75,5	75,5
17,1	20,8	10,5	40,3	0,0	57,8	77,7	77,7
20,0	10,2	20,8	18,8	0,2	26,6	161,3	161,3
7,1	5,7	107,8	0,0	36,4	18,3	-	18,3
1,9	1,3	2,9	6,3	13,9	19,5	-	19,5
20,8	2,3	13,5	5,9	4,9	43,6	-	43,6
79,5	0,6	109,8	55,3	19,7	73,6	-	73,6
31,9	0,5	179,2	24,7	4,2	18,7	-	18,7
196,0	7,5	52,3	3,7	125,8	38,3	-	38,3
102,4	6,1	10,9	54,5	2,8	0,3	-	0,3
<b>485,8</b>	<b>223,6</b>	<b>593,7</b>	<b>227,8</b>	<b>280,6</b>	<b>375,4</b>	-	<b>539,5</b>



## ANEXO III. PARÁMETROS DE MODELIZACIÓN EN ENERGYPLUS Y OPENSTUDIO

### III.1 MODELO DE REFERENCIA

A continuación, se detallan los parámetros de diseño del modelo de referencia en el orden en el que se van introduciendo en los diferentes apartados de OpenStudio y EnergyPlus. Los diferentes datos necesarios, e indicados en los apartados sucesivos se ha obtenido de diferentes fuentes bibliográficas. Para facilitar la comprensión se listan a continuación una serie de referencias numeradas con superíndices. Estos se añadirán junto a la información que corresponda en todo este Anexo III.

- <sup>1</sup> IDAE. 2012.
- <sup>2</sup> IVE. 2011.
- <sup>3</sup> María-Tomé, J.S. 2002.
- <sup>4</sup> Ministerio de Vivienda. 2010.
- <sup>5</sup> Cerámicas Moratal. 2022.
- <sup>6</sup> Barcelona LED Iluminación. 2022a.
- <sup>7</sup> Barcelona LED Iluminación. 2022b.
- <sup>8</sup> Samsung. 2019.
- <sup>9</sup> LG. 2022.
- <sup>10</sup> BajatelaPontencia.org. 2013.
- <sup>11</sup> Levitt, B. 2017.
- <sup>12</sup> Ministerio de Fomento. 2022b.
- <sup>13</sup> Ministerio de Fomento. 2022a.
- <sup>14</sup> Saint-Gobain. 2022.
- <sup>15</sup> Muñoz, V.B. 2016.
- <sup>16</sup> DANOSA España. 2021d.
- <sup>17</sup> Pladur. 2015.
- <sup>18</sup> DANOSA España. 2021b.
- <sup>19</sup> Bofill, N.C. 2017.
- <sup>20</sup> Ascione, F., Bianco, N., De' Rossi, F., *et al.* 2013.
- <sup>21</sup> Kazemi, M., Courard, L. 2022.
- <sup>22</sup> Zheng, X., Yang, Z. Yang, J., *et al.* 2022.
- <sup>23</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021d.
- <sup>24</sup> ZinCo Cubiertas Ecológicas. 2021e.



## EMPLAZAMIENTO

Se solicitan los datos relacionados con el entorno climático de la zona, en este caso en concreto se toman los de la ciudad de València<sup>1</sup>. El formato de los ficheros es *.epw* para el caso del archivo climático y *.ddy* para el documento con los datos de los días de diseño para el sistema de climatización. Este último documento incluye, como mínimo, la información más detallada de un día cálido de referencia y un día frío de referencia. En el archivo *.ddy* empleado se había introducido información sobre el 21 de agosto como día de diseño cálido (*SummerDesignDay*) y el 21 de febrero como día de diseño frío (*WinterDesignDay*). Por último, la simulación se realiza durante el año 2021.

En el caso de las cubiertas ajardinadas, para modelar las precipitaciones no sirve introducir valores de precipitaciones por horas en fichero *.epw*. Es necesario introducir las precipitaciones en el objeto *Site:Precipitation*, el cual no se encuentra en la interfaz gráfica OpenStudio, por lo que se deben introducir los parámetros de precipitaciones directamente en el programa EnergyPlus. Para cumplimentar adecuadamente este apartado se debe de seleccionar un modelo, que tan solo puede ser *ScheduleAndDesignLevel*, las precipitaciones totales anuales, en metros/años y las precipitaciones medias anuales de los últimos años, también en m/año. De acuerdo con los datos de los que se dispone para el año 2021, de la estación meteorológica de AEMET del Campus de Vera, en la UPV, las precipitaciones anuales totales de 2021 son de 375,4 mm (0,3754 m/año) y la media anual de los últimos años se considera de 0,4 m/año<sup>2</sup>.

También es necesario diseñar un horario en el que se introduce el patrón de eventos lluviosos para el año 2021. El tipo de horario será *Dimensionless* y los valores se introducen en metros y por horas<sup>3</sup>. En este caso se opta por calcular el promedio de las precipitaciones diarias o de un periodo de varios días e introducir en cada día este valor en una única hora (de 12:00 h a 13:00 h). La suma de los promedios introducidos en cada día debe dar el total de precipitaciones anuales, en este caso 0,3754 m. En la Tabla III.1 se marca en azul claro cada uno de los días en los que se producen precipitaciones, con la suma total diaria y el promedio introducido en el horario.

FECHA	PRECIPITACIONES DIARIAS (mm)	PRECIPITACIONES DIARIAS (m)	PROMEDIO (m)
01/01/2021	1,4	0,0014	0,0014
02/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/01/2021	5,9	0,0059	0,0069
08/01/2021	12,3	0,0123	0,0069
09/01/2021	2,6	0,0026	0,0069
10/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/01/2021	0,0	0,0000	0,0000

1 Climate.Onebuilding.org. 2022.

2 Big Ladder software. 2022.

3 *Ibidem*.



18/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
21/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
23/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
31/01/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
02/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
09/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/02/2021	6,0	0,0060	0,0036
15/02/2021	1,1	0,0011	0,0036
16/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
21/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/02/2021	4,7	0,0047	0,0047
23/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/02/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/03/2021	0,0	0,0000	0,0000





02/03/2021	0,1	0,0001	0,0031
03/03/2021	9,1	0,0091	0,0031
04/03/2021	0,0	0,0000	0,0031
05/03/2021	0,0	0,0000	0,0031
06/03/2021	0,4	0,0004	0,0031
07/03/2021	7,0	0,0070	0,0031
08/03/2021	5,3	0,0053	0,0031
09/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/03/2021	20,3	0,0203	0,0046
19/03/2021	0,2	0,0002	0,0046
20/03/2021	0,8	0,0008	0,0046
21/03/2021	1,4	0,0014	0,0046
22/03/2021	0,1	0,0001	0,0046
23/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
31/03/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/04/2021	0,0	0,0000	0,0000
02/04/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/04/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/04/2021	0,1	0,0001	0,0005
05/04/2021	0,0	0,0000	0,0005
06/04/2021	0,1	0,0001	0,0005
07/04/2021	0,3	0,0003	0,0005
08/04/2021	0,6	0,0006	0,0005
09/04/2021	1,2	0,0012	0,0005
10/04/2021	0,3	0,0003	0,0005
11/04/2021	0,9	0,0009	0,0005
12/04/2021	0,0	0,0000	0,0005
13/04/2021	0,0	0,0000	0,0005



14/04/2021	0,2	0,0002	0,0005
15/04/2021	0,0	0,0000	0,0005
16/04/2021	3,3	0,0033	0,0005
17/04/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/04/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/04/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/04/2021	0,3	0,0003	0,0034
21/04/2021	1,2	0,0012	0,0034
22/04/2021	20,4	0,0204	0,0034
23/04/2021	0,0	0,0000	0,0034
24/04/2021	0,2	0,0002	0,0034
25/04/2021	3,3	0,0033	0,0034
26/04/2021	21,0	0,0210	0,0034
27/04/2021	4,1	0,0041	0,0034
28/04/2021	0,0	0,0000	0,0034
29/04/2021	0,2	0,0002	0,0034
30/04/2021	0,1	0,0001	0,0034
01/05/2021	0,2	0,0002	0,0034
02/05/2021	0,0	0,0000	0,0034
03/05/2021	0,1	0,0001	0,0034
04/05/2021	0,2	0,0002	0,0034
05/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
09/05/2021	12,7	0,0127	0,0065
10/05/2021	0,2	0,0002	0,0065
11/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
21/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
23/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/05/2021	13,0	0,0130	0,0130
25/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/05/2021	0,0	0,0000	0,0000



27/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/05/2021	0,2	0,0002	0,0002
29/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
31/05/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/06/2021	2,7	0,0027	0,0027
02/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/06/2021	0,4	0,0004	0,0005
06/06/2021	0,5	0,0005	0,0005
07/06/2021	0,0	0,0000	0,0005
08/06/2021	2,2	0,0022	0,0005
09/06/2021	0,0	0,0000	0,0005
10/06/2021	0,1	0,0001	0,0005
11/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/06/2021	2,6	0,0026	0,0018
18/06/2021	0,0	0,0000	0,0018
19/06/2021	0,7	0,0007	0,0018
20/06/2021	0,8	0,0008	0,0018
21/06/2021	0,0	0,0000	0,0018
22/06/2021	0,0	0,0000	0,0018
23/06/2021	8,3	0,0083	0,0018
24/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/06/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
02/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/07/2021	1,8	0,0018	0,0018
08/07/2021	0,0	0,0000	0,0000



09/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
21/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
23/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/07/2021	17,7	0,0177	0,0177
27/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
31/07/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
02/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/08/2021	1,8	0,0018	0,0018
09/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/08/2021	0,2	0,0002	0,0002
20/08/2021	0,0	0,0000	0,0000



21/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
23/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/08/2021	2,5	0,0025	0,0155
25/08/2021	28,5	0,0285	0,0155
26/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/08/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/08/2021	10,6	0,0106	0,0115
31/08/2021	0,0	0,0000	0,0115
01/09/2021	32,3	0,0323	0,0115
02/09/2021	3,1	0,0031	0,0115
03/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
09/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/09/2021	0,1	0,0001	0,0031
12/09/2021	0,1	0,0001	0,0031
13/09/2021	0,0	0,0000	0,0031
14/09/2021	0,0	0,0000	0,0031
15/09/2021	0,8	0,0008	0,0031
16/09/2021	17,7	0,0177	0,0031
17/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/09/2021	5,0	0,0050	0,0028
21/09/2021	0,3	0,0003	0,0028
22/09/2021	7,3	0,0073	0,0028
23/09/2021	3,4	0,0034	0,0028
24/09/2021	0,0	0,0000	0,0028
25/09/2021	3,4	0,0034	0,0028
26/09/2021	0,1	0,0001	0,0028
27/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/09/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
02/10/2021	0,0	0,0000	0,0000



03/10/2021	4,3	0,0043	0,0040
04/10/2021	3,7	0,0037	0,0040
05/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
09/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/10/2021	0,3	0,0003	0,0003
18/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
21/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/10/2021	6,5	0,0065	0,0035
23/10/2021	0,4	0,0004	0,0035
24/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/10/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/10/2021	1,7	0,0017	0,0012
31/10/2021	1,8	0,0018	0,0012
01/11/2021	0,2	0,0002	0,0012
02/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
03/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
09/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/11/2021	0,4	0,0004	0,0006
11/11/2021	0,2	0,0002	0,0006
12/11/2021	1,3	0,0013	0,0006
13/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/11/2021	0,0	0,0000	0,0000



15/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/11/2021	7,7	0,0077	0,0052
20/11/2021	2,5	0,0025	0,0052
21/11/2021	0,6	0,0006	0,0052
22/11/2021	18,4	0,0184	0,0052
23/11/2021	5,3	0,0053	0,0052
24/11/2021	1,4	0,0014	0,0052
25/11/2021	0,3	0,0003	0,0052
26/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
28/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/11/2021	0,0	0,0000	0,0000
01/12/2021	0,2	0,0002	0,0002
02/12/2021	0,1	0,0001	0,0002
03/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
04/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
05/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
06/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
07/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
08/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
09/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
10/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
11/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
12/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
13/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
14/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
15/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
16/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
17/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
18/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
19/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
20/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
21/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
22/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
23/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
24/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
25/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
26/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
27/12/2021	0,0	0,0000	0,0000

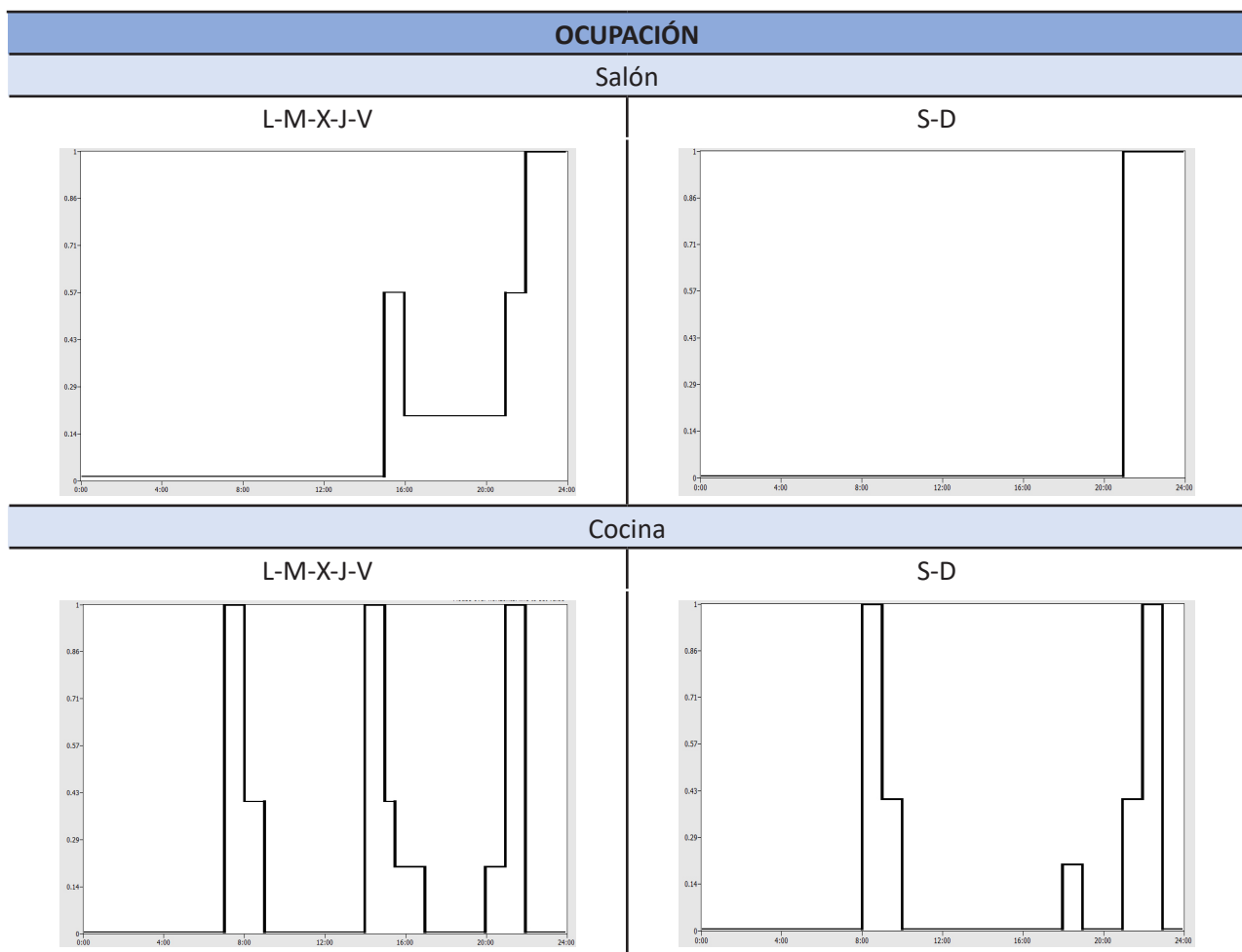


28/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
29/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
30/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
31/12/2021	0,0	0,0000	0,0000
<b>PRECIPITACIONES TOTALES ANUALES</b>			<b>0,3754</b>

Tabla III.1. Horario de precipitaciones, por día y en metros/hora.

### HORARIOS

Se diseñan horarios de ocupación, iluminación, equipos eléctricos, filtraciones de aire, ventilación y climatización en función de las rutinas de los usuarios de la vivienda y los periodos de uso de las diferentes estancias. También es necesario determinar el nivel de actividad de las personas en cada uno de los espacios para conocer, posteriormente, la carga interna de acuerdo con la ocupación y la actividad. Por ello, se describen a continuación los diferentes horarios, para cada estancia y para cada periodo de la semana. Se indican las iniciales de los días de la semana, diferenciando el periodo entre semana (Lunes-Martes-X miércoles-Jueves-Viernes) del periodo de fin de semana (Sábado-Domingo), excepto en aquellos casos en que el horario es el mismo para cualquier día (indicado como “Siempre”). Todos los horarios descritos a continuación (Tabla III.2) se mantienen activos a lo largo de todo el año, desde el 01/01/2021 hasta el 31/12/2021.







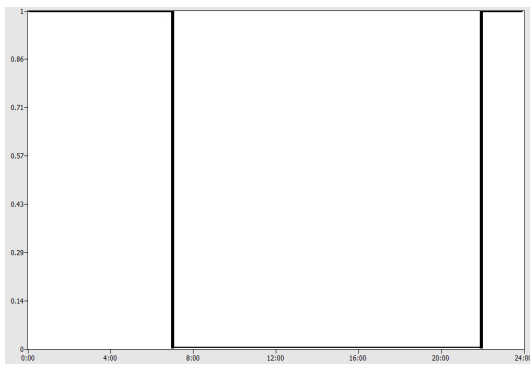
**Baño**

Siempre

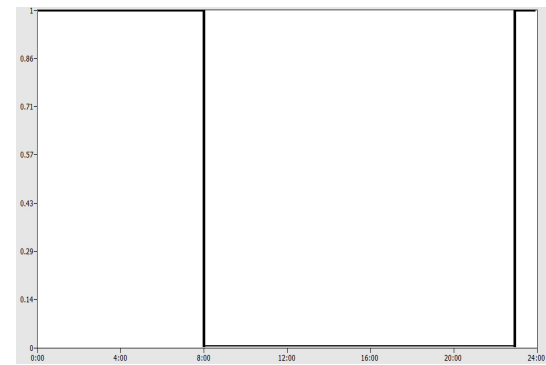


**Dormitorios**

L-M-X-J-V

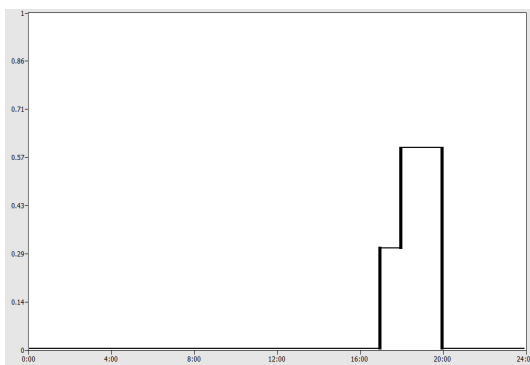


S-D

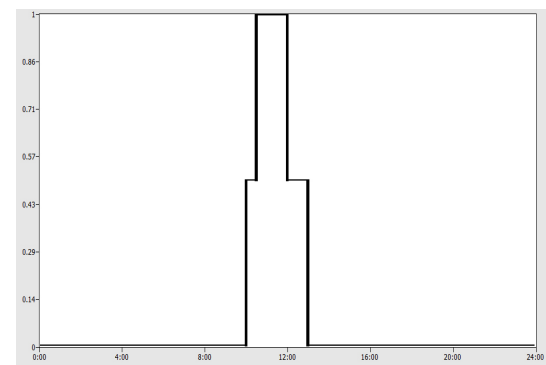


**Estudio**

L-M-X-J-V

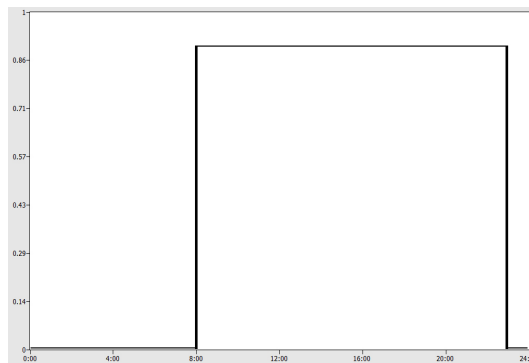


S-D



**Pasillo**

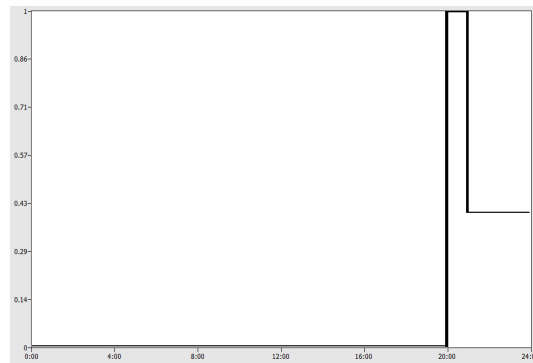
Siempre



### ILUMINACIÓN

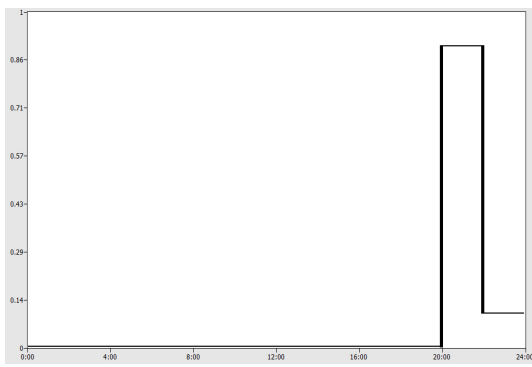
Salón

Siempre

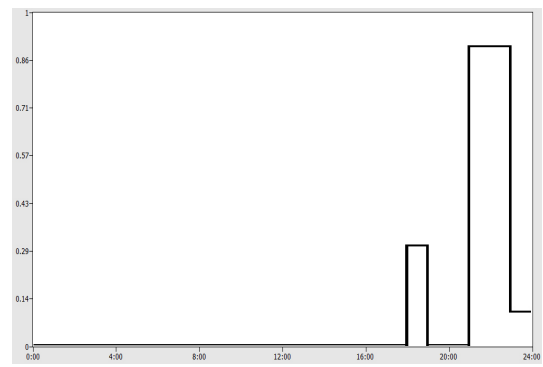


Cocina

L-M-X-J-V

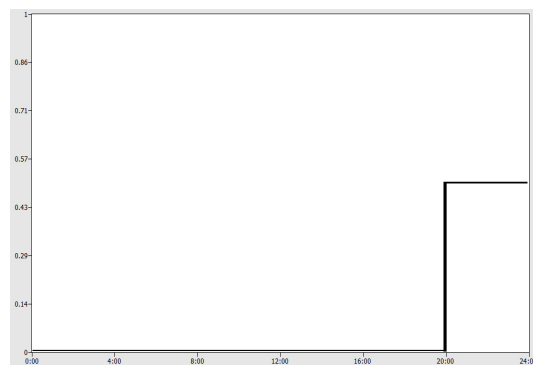


S-D



Baño

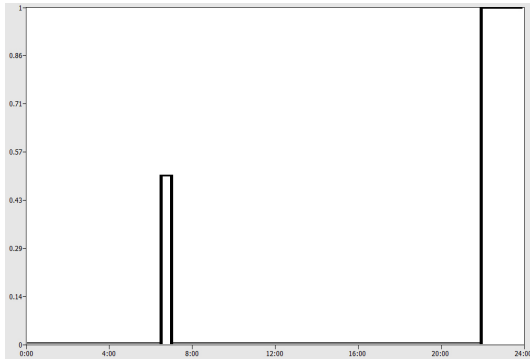
Siempre



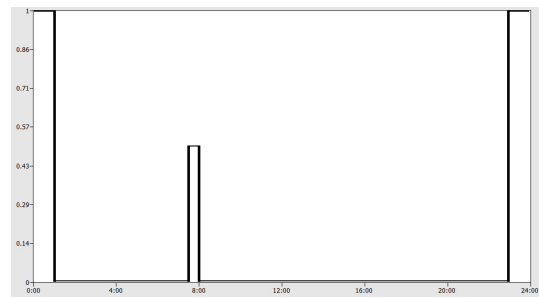


Dormitorios

L-M-X-J-V

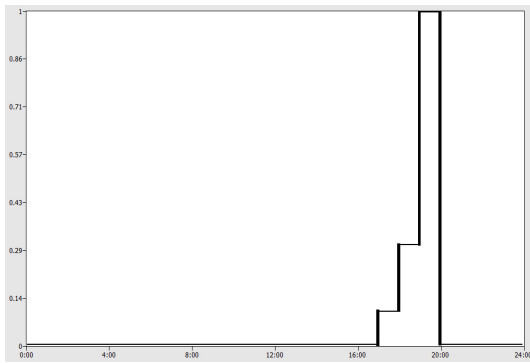


S-D

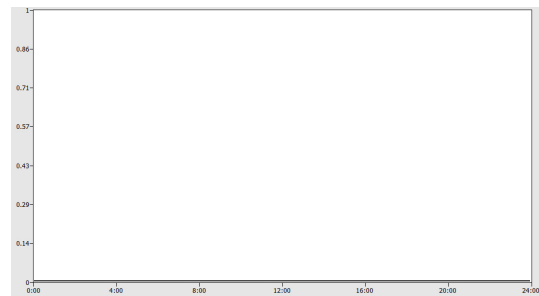


Estudio

L-M-X-J-V

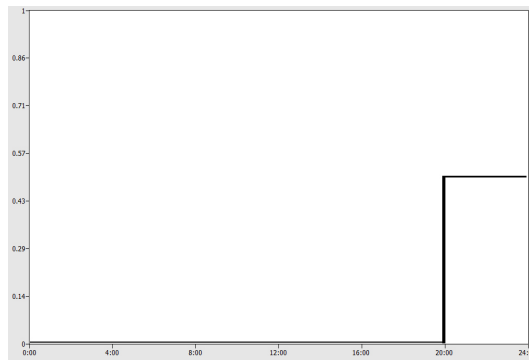


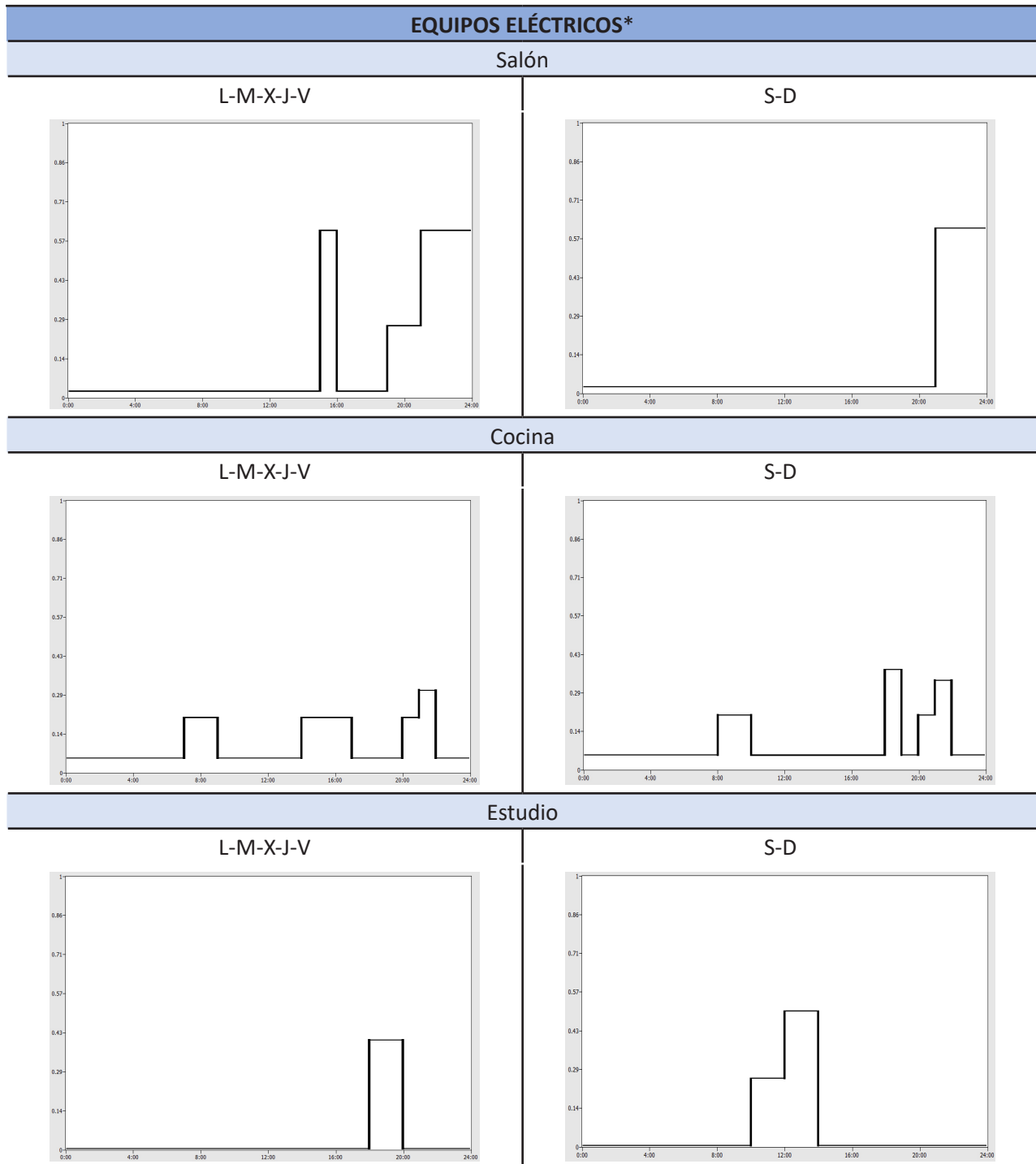
S-D



Pasillo

Siempre





\* Tan solo se diseñan horarios de equipos eléctricos para salón, cocina y estudio porque el resto de las estancias no disponen de equipos eléctricos.

Tabla III.2. Horarios de ocupación, iluminación y equipos eléctricos para cada estancia.

Estos horarios (Tabla III.2) son del tipo fraccional y se han diseñado considerando la rutina de la familia conviviente en la vivienda, además de haber consultado otros estudios que han realizado simulaciones similares con EnergyPlus y OpenStudio<sup>4</sup>.

Respecto a los horarios de actividad son del tipo *ActivityLevel*. Se mantienen constantes a un valor de W/persona en función de la actividad desarrollada en cada estancia. Se determinan los niveles de actividad en la Tabla III.3.

4 Castro, A.P. 2020.



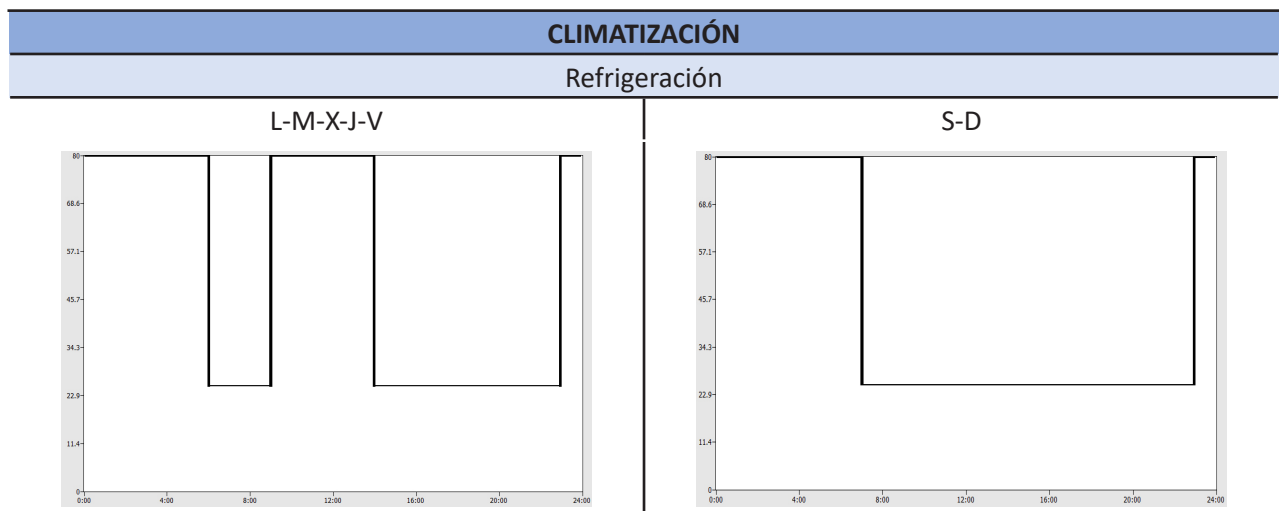
ACTIVIDAD			
Tipo de actividad	Espacio asociado	Tasa metabólica (W/m <sup>2</sup> )	Nivel de actividad (W/persona)
Recostado	Dormitorio	46 <sup>1</sup>	83
Sentado, relajado	Salón	58 <sup>1</sup>	104
Actividad sedentaria	Estudio Pasillo Baño	70 <sup>1</sup>	126
De pie, actividad media	Cocina	116 <sup>1</sup>	209

Tabla III.3. Tipo y nivel de actividad asociado a cada estancia.

Para el paso de W/m<sup>2</sup> a W/persona se considera que la superficie de piel de un cuerpo de una persona adulta estándar es 1,8 m<sup>2</sup>, valor por el cual se deberá multiplicar la tasa metabólica<sup>5</sup>.

En el caso de los horarios de filtraciones de aire y ventilación, se trata de horarios del tipo *On/Off*. Se considera siempre activo (Siempre *On*), por lo que se diseñaran con un valor constante de 1. Este horario es de aplicación para todas las estancias.

Por último, para el diseño de los horarios de funcionamiento de los sistemas de climatización, en primer lugar, es necesario determinar las temperaturas de consigna. Se toman como referencia las temperaturas de confort interior establecidas por el RITE<sup>6</sup> para espacios con actividades cuya tasa metabólica sea igual o inferior a 1,2 met (70 W/m<sup>2</sup>). Simplificamos considerando que este es el caso de toda la vivienda, ya que únicamente la cocina presenta tasas metabólicas mayores. De acuerdo con estas temperaturas de confort, tanto para verano (23-25 °C) como para invierno (21-23 °C), la temperatura de consigna de refrigeración será de 25 °C y para calefacción de 21 °C. Respecto al horario (Tabla III.4), será del tipo *Temperature*. Estos horarios se aplican a todas las estancias.



5 Big Ladder software. 2022.

6 Ministerio de Presidencia. 2021.

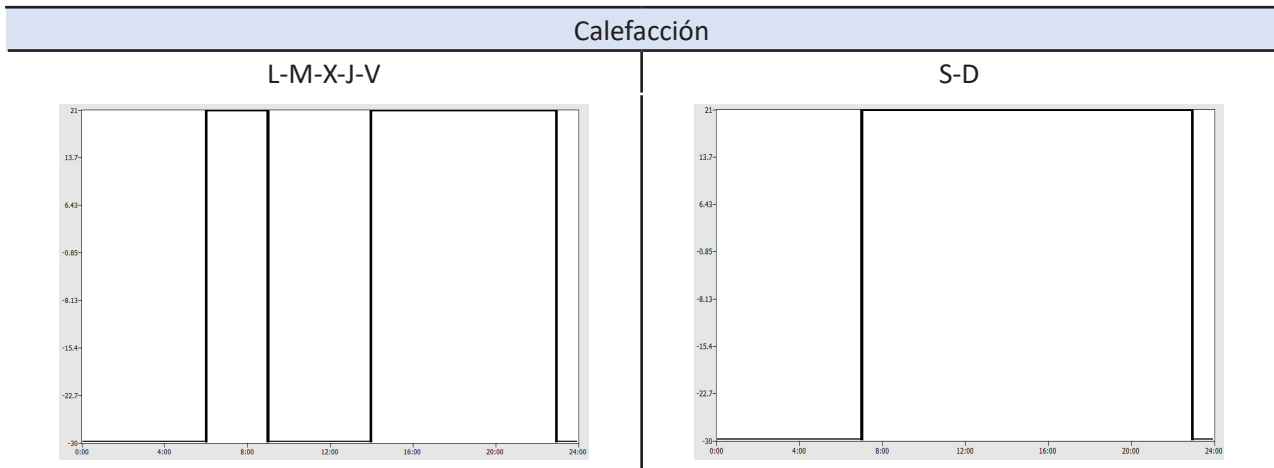


Tabla III.4. Horarios de refrigeración y calefacción en función de la temperatura de consigna.

**CONSTRUCCIONES**

En este apartado se describen, en primer lugar, los sistemas constructivos empleados. Se trata de una construcción realizada en València, entre las décadas de 1950 y 1960. Mediante la consulta de los sistemas constructivos propios de la época, y posibles pequeñas modificaciones posteriores, como la introducción de un falso techo para el paso de instalaciones e iluminación, se determinan los siguientes sistemas constructivos (Tabla III.5, III.6, III.7, III.8, III.9, III.10, III.11, III.12 y Figura III.1, III.2, III.3, III.4).

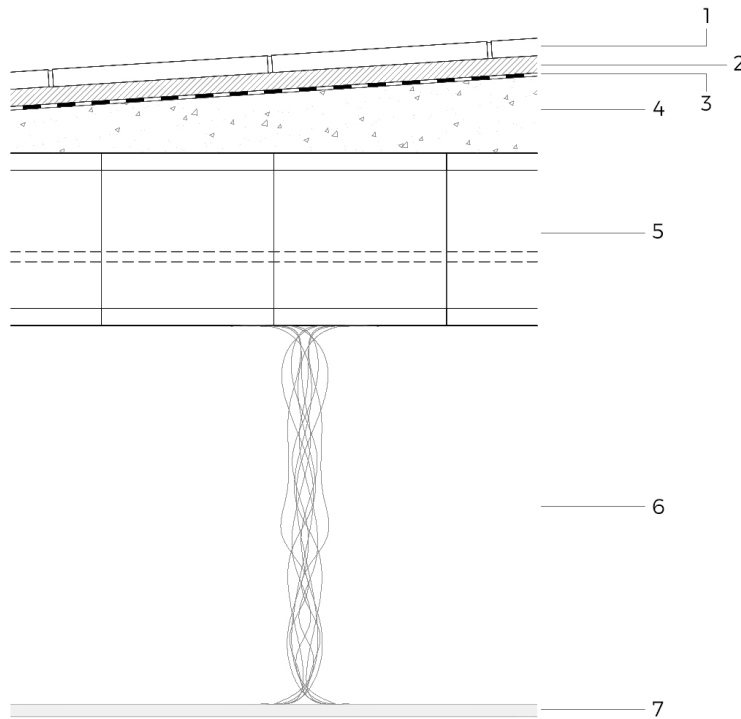


Figura III.1. Detalle constructivo de cubierta convencional.



<b>Cubierta</b>	<i>Exterior</i>	1	Baldosa cerámica: 2 cm <sup>2</sup>
		2	Mortero de cemento de agarre: 2 cm <sup>2</sup>
		3	Lámina impermeable LBM: 0,50 cm <sup>2</sup>
		4	Hormigón de áridos ligeros para formación de pendientes, con función aislante: 10 cm <sup>2</sup>
		5	Forjado tipo: unidireccional con entrevigado de yeso sin capa de compresión: 20 cm <sup>2,3</sup>
		6	Cámara de aire: 50 cm
	<i>Interior</i>	7	Placa de escayola: 1,60 cm <sup>2</sup>

Tabla III.5. Sistema constructivo de cubierta convencional.

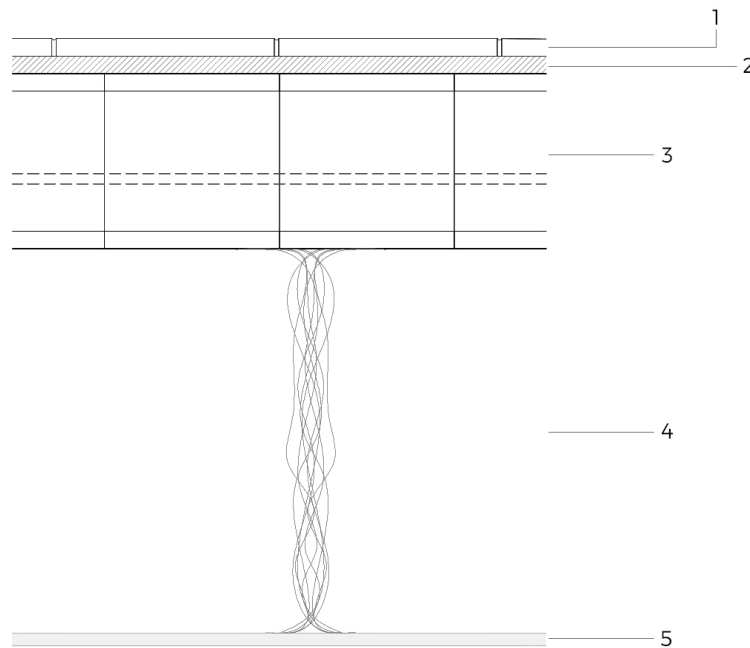


Figura III.2. Detalle constructivo de forjado interior.

<b>Forjado interior<sup>A B</sup></b>	<i>Exterior</i>	1	Baldosa cerámica: 2 cm <sup>2</sup>
		2	Mortero de cemento de agarre: 2 cm <sup>2</sup>
		3	Forjado tipo: unidireccional con entrevigado de yeso sin capa de compresión: 20 cm <sup>2,3</sup>
		4	Cámara de aire: 50 cm
	<i>Interior</i>	5	Placa de escayola: 1,60 cm <sup>2</sup>

<sup>A</sup> Este tipo de forjado interior solo se utiliza en el caso de la vivienda en un edificio residencial de varias plantas. En este caso los forjados interiores son aquellos entre las diferentes plantas.

<sup>B</sup> En el programa se pide diferenciar entre suelo interior y techo interior. Ambos sistemas tendrán esta secuencia de capas, pero con orden invertido.

Tabla III.6. Sistema constructivo de forjado interior.

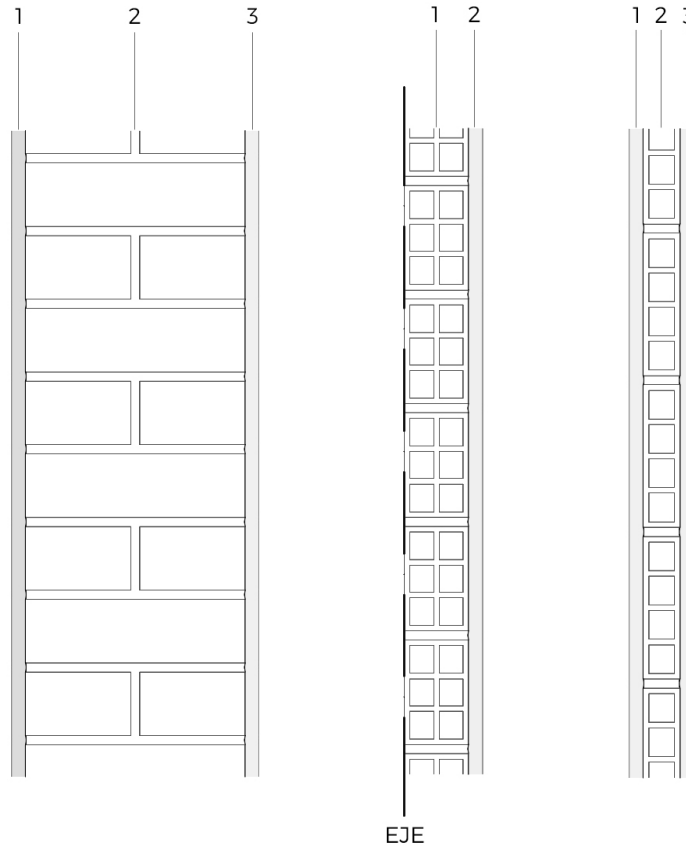


Figura III.3. Detalle constructivo de fachada (izq.), de medianera (centro) y de particiones interiores (dcha.).

<b>Fachada*</b>	Exterior	1	Enfoscado de mortero: 1,50 cm <sup>2</sup>
		2	Ladrillo macizo de 1 pie: 24 cm <sup>2</sup>
	Interior	3	Enlucido de yeso: 1,50 cm <sup>2</sup>

\* El sistema estructural de la vivienda es mixto (pilares de ladrillo y muros de carga), por lo que la fachada funciona también como muro de carga.

Tabla III.7. Sistema constructivo de fachada.

<b>Medianera</b>	Exterior	1	Ladrillo doble hueco en vertical: 7 cm <sup>2</sup>
	Interior	2	Enlucido de yeso: 1,50 cm <sup>2</sup>

Tabla III.8. Sistema constructivo de medianera.

<b>Medianera con zonas comunes*</b>	Exterior		Enlucido de yeso: 1,50 cm <sup>2</sup>
			Ladrillo doble hueco en vertical: 7 cm <sup>2</sup>
	Interior		Enlucido de yeso: 1,50 cm <sup>2</sup>

\* Este tipo de medianera solo se utiliza en el caso de la vivienda en un edificio residencial de varias plantas. En este caso, la medianera con zonas comunes son aquellas paredes de la vivienda en contacto con la caja de escalera.

Tabla III.9. Sistema constructivo de medianera con zonas comunes.

<b>Particiones interiores</b>	Exterior	1	Enlucido de yeso: 1,50 cm <sup>2</sup>
		2	Ladrillo simple hueco: 4 cm <sup>2</sup>
	Interior	3	Enlucido de yeso: 1,50 cm <sup>2</sup>

Tabla III.10. Sistema constructivo de particiones interiores.





<b>Solera</b>	<i>Exterior</i>	1	Relleno de zahorras: 15 cm
		2	Solera de hormigón: 15 cm <sup>2</sup>
		3	Mortero de cemento de agarre: 2 cm <sup>2</sup>
	<i>Interior</i>	4	Baldosa cerámica: 2 cm <sup>2</sup>

Tabla III.11. Sistema constructivo de solera.

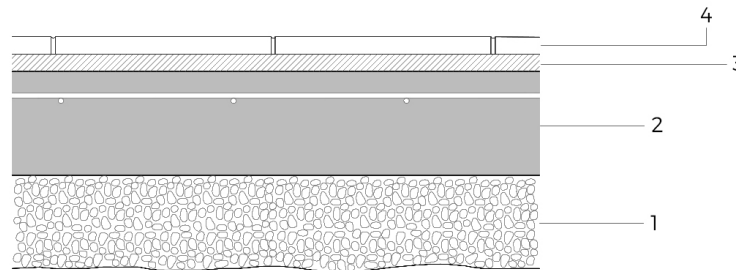


Figura III.4. Detalle constructivo de solera.

<b>Puerta de acceso</b>	Madera maciza: panel de madera sólida, madera natural, espesor 5 cm, sistema abatible <sup>2</sup>
<b>Ventanas</b>	Vidrio monolítico: sencillo de 6 mm de espesor, sistema corredero <sup>2</sup>
	Carpintería de aluminio: sin RPT, anodizado <sup>2</sup>

Tabla III.12. Solución constructiva para puerta de acceso y ventanas.

Para el diseño térmico de estas soluciones constructivas es necesario determinar las características concretas de cada material. En la Tabla III.13 se presentan las propiedades de cada uno de los materiales empleados. Los datos se han obtenido a través de la consulta de diferentes documentos, tanto de la normativa en vigor como de fichas técnicas, catálogos de soluciones constructivas propias de la época y otros estudios que han realizado simulaciones similares con EnergyPlus y OpenStudio. Se indican en la Tabla III.13 las propiedades de los materiales que componen los sistemas constructivos de la envolvente y la puerta de acceso, a excepción de la cámara de aire del falso techo que se indica en la Tabla III.14. Respecto a los materiales indicados en la Tabla III.13, en todos ellos se ha considerado un factor de absorción térmico de 0,9, de absorción solar de 0,6 y de absorción de espectro visible de 0,6, de acuerdo con la bibliografía consultada<sup>7</sup>.

En la Tabla III.15 y III.16 se indican los datos necesarios para la modelización térmica de las ventanas, tanto el vidrio como el marco. La división en cuatro tablas se debe a que en la interfaz OpenStudio se separan los materiales de acuerdo con esta clasificación.



MATERIALES				
Nombre	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico (J/kgK)
Baldosa cerámica	0,02 <sup>2</sup>	1,00 <sup>2</sup>	2000 <sup>2</sup>	800 <sup>2</sup>
Enfoscado de mortero	0,015 <sup>2</sup>	1,30 <sup>2</sup>	1900 <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>
Enlucido de yeso	0,015 <sup>2</sup>	0,40 <sup>2</sup>	900 <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>
Forjado tipo	0,20 <sup>2</sup>	0,56 <sup>2</sup>	1025 <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>
Hormigón de áridos ligeros	0,10	1,35 <sup>4</sup>	2000 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Ladrillo doble hueco	0,115	0,32 <sup>4</sup>	770 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Ladrillo macizo	0,24	0,85 <sup>4</sup>	2300 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Ladrillo simple hueco	0,04	0,29 <sup>5</sup>	800 <sup>5</sup>	1000 <sup>4</sup>
Lámina impermeable LBM	0,005	0,23 <sup>4</sup>	1100 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Solera de hormigón	0,20 <sup>2</sup>	2,50 <sup>2</sup>	2400 <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>
Madera maciza	0,05	0,21 <sup>4</sup>	700 <sup>4</sup>	1600 <sup>4</sup>
Mortero de cemento de agarre	0,02	1,30 <sup>4</sup>	1900 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Placa escayola	0,016 <sup>2</sup>	0,25 <sup>2</sup>	900 <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>
Relleno zahorras	0,15	2,00 <sup>4</sup>	2200 <sup>4</sup>	1180 <sup>4</sup>

Tabla III.13. Propiedades de los materiales empleados para la formación de los sistemas constructivos.

MATERIALES PARA CÁMARA DE AIRE	
Nombre	Resistencia térmica (m <sup>2</sup> K/W)
Cámara de aire [50 cm]	0,16 <sup>4</sup>

Tabla III.14. Propiedades de los materiales empleados como cámara de aire.

MATERIALES PARA ACRITALAMIENTO DE VENTANAS		
Nombre	Transmitancia (W/m <sup>2</sup> K)	Factor solar
Vidrio monolítico [6 mm]	5,70 <sup>4</sup>	0,83 <sup>4</sup>

Tabla III.15. Propiedades de los materiales empleados para acristalamiento de ventanas.

MATERIALES PARA MARCO DE VENTANAS				
Nombre	Ancho marco (m)	Proyección exterior marco (m)	Proyección interior marco (m)	Transmitancia (W/m <sup>2</sup> K)
Aluminio	0,047	0,005	0,005	5,70 <sup>4</sup>

Tabla III.16. Propiedades de los materiales empleados para marco de ventanas.

### CARGAS INTERNAS

En este apartado se indican las diferentes cargas que se producen en el interior de las estancias debido a la ocupación, iluminación y equipos eléctricos. Respecto a las cargas por ocupación se indica el número máximo de personas que se considera que pueden estar simultáneamente en cada estancia (Tabla III.17), considerando una fracción radiante en todos los casos igual a 0,3. Estos valores se combinan con los horarios de ocupación y nivel de actividad para determinar la carga interna por ocupación.



OCUPACIÓN	
Estancia	Número de personas
Salón	4
Cocina	4
Baño	1
Dormitorio doble principal	2
Dormitorio individual	1
Estudio	2
Pasillo	1

Tabla III.17. Número máximo de personas simultáneamente en cada estancia.

Respecto a las cargas de iluminación, se determinan la cantidad de puntos de luz, el tipo y la potencia, sumando el total de potencia en cada estancia (Tabla III.18). Para la obtención de estos datos se han consultado las fichas técnicas de los productos. Para todos los casos se considera que la iluminación LED tiene una fracción radiante de 0,2, fracción visible de 0,2 y fracción de calor devuelto al falso techo de 0<sup>8</sup>.

ILUMINACIÓN		
Espacio	Tipo de iluminación	Potencia (W)
Salón	5 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 9 cm	30 <sup>6</sup>
	1 x Lámpara de pie LED	6
	<b>TOTAL</b>	<b>36</b>
Cocina	2 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 22,2 cm	40 <sup>7</sup>
	1 x Luz LED para cuarto despensa	6
	<b>TOTAL</b>	<b>46</b>
Baño	3 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 9 cm	18 <sup>6</sup>
	<b>TOTAL</b>	<b>18</b>
Dormitorio doble principal	4 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 9 cm	24 <sup>6</sup>
	2 x Lámpara mesilla LED	10
	<b>TOTAL</b>	<b>34</b>
Dormitorio individual	3 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 9 cm	18 <sup>6</sup>
	1 x Lámpara mesilla LED	5
	<b>TOTAL</b>	<b>23</b>
Estudio	4 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 9 cm	24 <sup>6</sup>
	2 x Lámpara escritorio LED	12
	<b>TOTAL</b>	<b>36</b>
Pasillo	4 x Foco <i>downlight</i> LED Ø 9 cm	24 <sup>6</sup>
	<b>TOTAL</b>	<b>24</b>

Tabla III.18. Potencia total de iluminación instalada en cada estancia (W).

En el caso de las cargas por equipos eléctricos se procede de igual forma (Tabla III.19). En los espacios donde hay equipos eléctricos se define cuáles son y la potencia que tienen. Para todos los casos se considera una fracción latente de 0, fracción radiante de 0,7 y fracción perdida de 0<sup>9</sup> (véase apartado 7.3.2.2.1).

8 Llumor. 2022.

9 Sólo Arquitectura. 2019.



EQUIPOS ELÉCTRICOS		
Espacio	Equipos eléctricos	Potencia (W)
Salón	Televisión de 65'	135 <sup>8</sup>
	Minicadena	100 <sup>9</sup>
	<b>TOTAL</b>	<b>235</b>
Cocina	Frigorífico	250 <sup>10</sup>
	Microondas	900 <sup>10</sup>
	Lavadora	1500 <sup>10</sup>
	Horno	1200 <sup>10</sup>
	Vitrocerámica	900 <sup>10</sup>
	<b>TOTAL</b>	<b>4750</b>
Estudio	2 x Ordenador portátil	180
	<b>TOTAL</b>	<b>180</b>

Tabla III.19. Potencia total de equipos eléctricos instalados en cada estancia (W).

### TIPOS DE ESPACIOS

En este apartado se definen los tipos de espacios, pudiéndose relacionar con unos sistemas constructivos y unos horarios por defecto para hacer más fácil el proceso de modelaje. Además de definir con que tipos de espacios queremos trabajar, también será necesario definir en este apartado las filtraciones de aire (Tabla III.20). En el apartado *Space Infiltration Design Flow Rates* determinaremos unas filtraciones de aire de 0,7 ACH sobre 1. Este valor depende de los puntos débiles que tenga la envolvente, por los que se puedan producir filtraciones de aire. En un clima cálido, como es el caso de València, además de tratarse de una construcción antigua, las filtraciones serán elevadas<sup>10</sup>.

TIPOS DE ESPACIO	ESTANCIAS DE LA VIVIENDA	FILTRACIONES (ACH)
Tipo Salón	Salón	0,70 <sup>11</sup>
Tipo Cocina	Cocina	0,70 <sup>11</sup>
Tipo Baño	Baño	0,70 <sup>11</sup>
Tipo Dormitorio principal	Dormitorio doble principal	0,70 <sup>11</sup>
Tipo Dormitorio individual	Dormitorio individual 1 Dormitorio individual 2	0,70 <sup>11</sup>
Tipo Estudio	Estudio	0,70 <sup>11</sup>
Tipo Pasillo	Pasillo	0,70 <sup>11</sup>

Tabla III.20. Tipos de espacio relacionados con las estancias de la vivienda y filtraciones de aire (ACH).

Una vez determinados los tipos de espacios, se le asociará a cada uno las cargas internas de ocupación, iluminación y equipos eléctricos que corresponda. También se asociará con los horarios de ocupación, iluminación, equipos eléctricos, actividad y filtraciones.

### INSTALACIONES

En las diferentes pestañas que componen este apartado se puede modificar la orientación del norte, la altura libre entre plantas de forjado a forjado (en este caso 2,90 m) o el tipo y materialidad de los elementos de sombra, si es el caso.

<sup>10</sup> Levitt, B. 2017.



## ZONAS TÉRMICAS

Se trata de definir las diferentes zonas térmicas en el interior de la vivienda. Una zona térmica se compone de uno o varios espacios que se modelizan como un conjunto a la hora de proyectar su ventilación y climatización. Es decir, uno o varios espacios que queremos que presenten las mismas características térmicas en el interior. Haciendo una comparativa con un sistema de climatización por conductos, serían espacios conectados a la misma máquina. Por lo tanto, cuando esta se ponga en funcionamiento refrigerará o calentará todos los espacios que forman una zona térmica por igual, hasta alcanzar la temperatura de consigna.

Como se indicó previamente, el diseño y particularidades de las unidades y el sistema de climatización queda fuera del alcance de esta investigación, por lo que se emplea el *Ideal Air Loads System* (véase apartado 7.2.1). Por lo tanto, en el apartado de Sistemas HVAC de la interfaz OpenStudio no será necesario diseñar ningún sistema.

Cada zona térmica se deberá enlazar con los horarios de calefacción y refrigeración. Además, se deberá diseñar un sistema de ventilación natural en el apartado *Zone Equipment*. De acuerdo con el CTE DB-HS<sup>11</sup>, cada estancia tendrá un caudal mínimo para ventilación de caudal constante. Este caudal mínimo, para una vivienda con 3 o más dormitorios, debe dividirse entre el volumen de cada estancia para obtener las renovaciones de aire por hora (ACH), valor que introduciremos en el programa. En la Tabla III.21 se puede observar el caudal mínimo de acuerdo a normativa (L/s), el cambio a las unidades que nos son útiles (m<sup>3</sup>/h), el volumen de cada estancia (m<sup>3</sup>) y las renovaciones de aire por hora de cada estancia (ACH). El pasillo no dispone de ventanas al exterior, por lo que no se le diseña ventilación natural. Al tratarse de una construcción antigua, sin rehabilitaciones integrales y en la cual todas las estancias tienen ventanas al exterior, no se disponen de mecanismos de ventilación mecánica.

VENTILACIÓN NATURAL				
Estancias	Caudal mínimo (L/s)	Caudal mínimo (m <sup>3</sup> /h)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Renovaciones de aire por hora (ACH)
Salón	10 <sup>12</sup>	36	44,37	0,81
Cocina	16,50 <sup>12</sup>	59,40	31,32	1,90
Baño	16,50 <sup>12</sup>	59,40	7,54	7,88
Dormitorio doble principal	8 <sup>12</sup>	28,80	33,93	0,85
Dormitorio individual 1	4 <sup>12</sup>	14,40	29,87	0,48
Dormitorio individual 2	4 <sup>12</sup>	14,40	23,49	0,61
Estudio	10 <sup>12</sup>	36	23,20	1,55

Tabla III.21. Obtención de la ventilación natural para cada estancia (ACH).

Cada zona térmica se compone de uno o más espacios. La ventilación natural diseñada para cada zona térmica es el valor mayor de entre las estancias que componen los espacios que integran cada zona térmica, de acuerdo con la Tabla III.21. Por ejemplo, la zona térmica 4 incluye los tipos de espacios Dormitorio principal y Dormitorio individual. Esto quiere decir que dentro de la zona térmica 4 se encuentran tres estancias: Dormitorio doble principal, Dormitorio individual 1 y Dormitorio individual 2. De entre estas tres estancias la mayor ventilación es 0,85 ACH (correspondiente al dormitorio doble principal). En este caso, como se indica en la Tabla III.22, la ventilación natural que corresponde a la zona térmica 4 es 0,85 ACH. La ventilación natural irá asociada al horario de ventilación, siempre activo (Siempre *On*).

11 Ministerio de Fomento. 2022b.



ZONAS TÉRMICAS	TIPOS DE ESPACIO	ACTIVAR <i>IDEAL AIR LOADS</i>	VENTILACIÓN (ACH)
Zona térmica 1	Salón Estudio	Sí	1,55
Zona térmica 2	Cocina	Sí	1,90
Zona térmica 3	Baño	Sí	7,88
Zona térmica 4	Dormitorio principal Dormitorio individual	Sí	0,85
Zona térmica 5	Pasillo	Sí	-

Tabla III.22. Tipos de espacios y ventilación asociados a cada zona térmica.

### ESPACIOS

Todas las estancias de la vivienda se asocian con un tipo de espacio determinado, de acuerdo con los definidos en los pasos anteriores. En este apartado quedan definidos ya cada uno de los espacios con unos horarios, cargas y zonas térmicas. Asimismo, cada una de las superficies tendrá ya un sistema constructivo asociado. En este apartado se trata de comprobar que todos los pasos anteriores se han realizado correctamente y cada estancia y superficie está definido por las variables necesarias y de forma correcta.



## III.2 PROPUESTAS DE REHABILITACIÓN

Para la modelización de las diferentes propuestas de rehabilitación hay ciertos apartados que no se van a alterar, ya que el diseño o los valores empleados en el modelo de referencia son aplicables tras la rehabilitación. Este es el caso de los apartados de emplazamiento, horarios, cargas internas, instalaciones, zonas térmicas y espacios.

El principal apartado que va a sufrir alteraciones es el de construcciones, mientras que el de tipo de espacios tan solo va a sufrir una pequeña alteración en el caso de se rehabilite toda la envolvente del edificio.

### CONSTRUCCIONES

Se definen a continuación los nuevos sistemas constructivos introducidos tras la rehabilitación, tanto si se trata de una mejora de la transmitancia térmica de la cubierta como de toda la envolvente. Como se ha indicado en el apartado 7.2.2.2 los elementos de la envolvente térmica se diseñarán en base a la transmitancia límite del CTE DB-HE para zona climática B (València)<sup>12</sup>. En el caso de la cubierta, se diseñarán tres sistemas constructivos (A-B-C), su respectivo sistema de capas y los materiales que lo componen. En cambio, para el resto de la envolvente (que no es centro del estudio), no se determinarán todas las capas del sistema constructivo, sino que únicamente se creará un nuevo material que cumpla con los requisitos de transmitancia térmica establecidos en la normativa.

Como se puede observar en las Tablas III.23, III.24 y III.25, el sistema estructural de cubierta (forjado tipo) se mantiene intacto, rehabilitando únicamente las capas superiores y el falso techo interior. En este caso se mantiene una cámara de aire de 50 cm para el paso de instalaciones, pero se sustituye la placa de escayola por una placa de yeso prefabricado espacial para su aplicación en techos. Cabe destacar que EnergyPlus y OpenStudio no permiten realizar sistemas constructivos de más de 10 capas. Por lo tanto, se han simplificado todos los diseños de cubierta, eliminando las capas separadoras (cuya influencia en el comportamiento higrotérmico se considera mínimo, y, por lo tanto, prescindible) y, en el caso de los modelos B y C, con mayor cantidad de capas, se han unificado en una sola capa la drenante y la lámina filtrante (Figura III.5, III.6 y III.7).

Para el resto de elementos de la envolvente se determina que transmitancia térmica deben cumplir de acuerdo con la normativa (Tabla III.26). La rehabilitación de la fachada se llevará a cabo mediante el sistema SATE, instalando por el exterior una capa de material aislante (EPS) con revestimiento continuo reforzado con malla de fibra de vidrio (en sucesivas capas necesarias para la correcta ejecución del sistema). Respecto a la medianera y la solera, la incapacidad de actuar por el exterior implicará la introducción de material aislante por el interior. En el caso de la medianera se añadirá una capa de material aislante en el interior de un trasdosado de paneles de yeso laminado. Respecto a la solera, se levantará el pavimento y se dispondrá una capa aislante y otra impermeable para asegurar el aislamiento y la estanqueidad de la solución constructiva.

En el caso de los elementos interiores, estos no se modifican, como es el caso de las particiones interiores. Para el caso de la medianera con elementos comunes y el forjado interior, estos sistemas constructivos tan solo se aplican en el caso de rehabilitar un edificio residencial de varias plantas, y este supuesto se ha rehabilitado tan solo instalando un sistema ajardinado extensivo en la cubierta (véase apartado 7.2). Por lo tanto, en este supuesto de rehabilitación de un edificio residencial de varias plantas no se ha mejorado la transmitancia de todos los elementos de la envolvente térmica de la vivienda, por lo que solo se modifica la transmitancia térmica de la cubierta.

12 Ministerio de Fomento. 2022a.

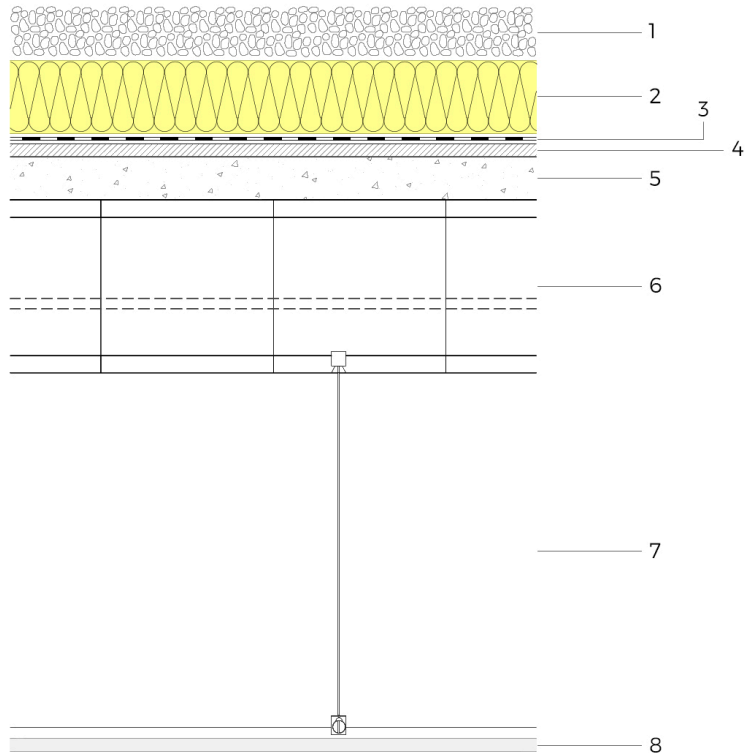


Figura III.5. Detalle constructivo de cubierta del modelo A tras rehabilitación.

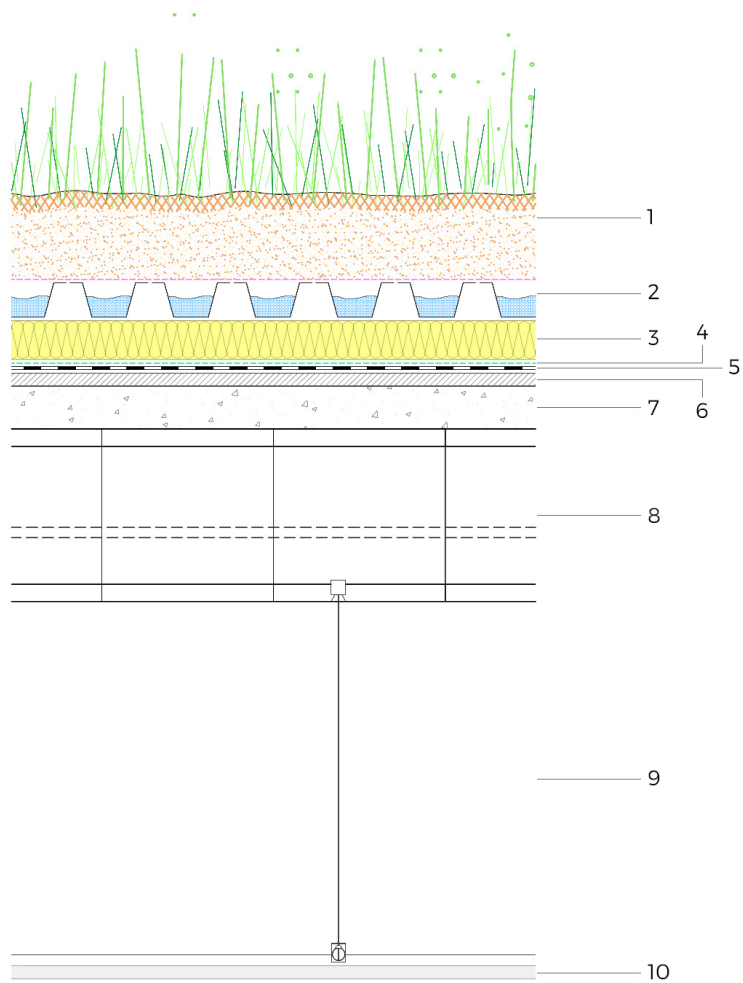


Figura III.6. Detalle constructivo de cubierta del modelo B tras rehabilitación.



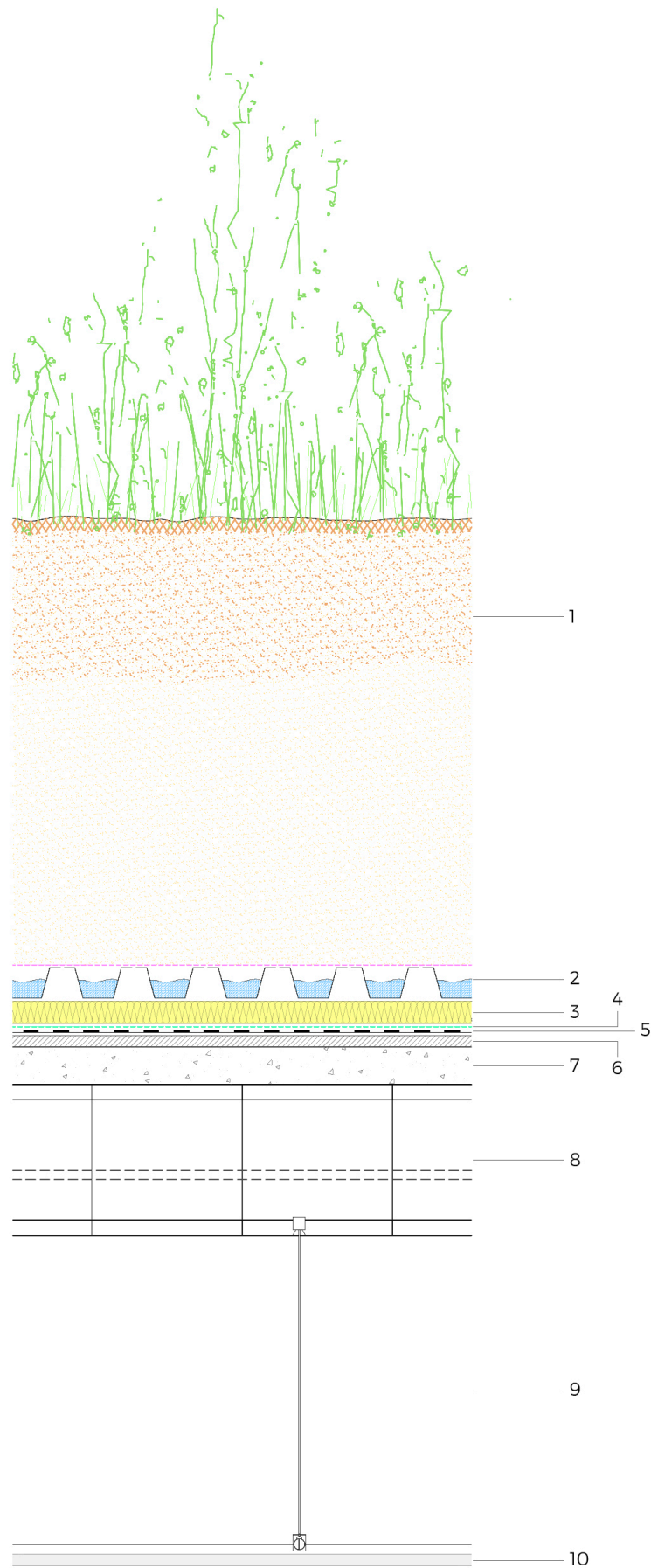


Figura III.7. Detalle constructivo de cubierta del modelo C tras rehabilitación.



<b>Cubierta Modelo A</b>	<i>Exterior</i>	1	Grava: 6 cm
		2	XPS 8: material aislante de 8 cm
		3	Lámina impermeable EPDM: 0,12 cm
		4	Mortero de cemento de regulación: 1,50 cm
		5	Hormigón de áridos ligeros: 10 cm
		6	Forjado tipo: unidireccional con entrevigado de yeso sin capa de compresión: 20 cm <sup>2 3</sup>
		7	Cámara de aire: 50 cm
	<i>Interior</i>	8	Placa de yeso para techo: 1,50 cm

Tabla III.23. Sistema constructivo de cubierta del modelo A tras rehabilitación.

<b>Cubierta Modelo B</b>	<i>Exterior</i>	1	Ajardinamiento extensivo	Vegetación: 10 cm
				Substrato: 10 cm
		2	Capa drenante + lámina filtrante: 4 cm + 0,10 cm	
		3	XPS 6: material aislante de 6,50 cm	
		4	Lámina antiraíces: 0,40 cm	
		5	Lámina impermeable EPDM: 0,12 cm	
		6	Mortero de cemento de regulación: 1,50 cm	
		7	Hormigón de áridos ligeros: 10 cm	
		8	Forjado tipo: unidireccional con entrevigado de yeso sin capa de compresión: 20 cm <sup>2 3</sup>	
	9	Cámara de aire: 50 cm		
<i>Interior</i>	10	Placa de yeso para techo: 1,50 cm		

Tabla III.24. Sistema constructivo de cubierta del modelo B tras rehabilitación.

<b>Cubierta Modelo C</b>	<i>Exterior</i>	1	Ajardinamiento intensivo	Vegetación: 40 cm
				Substrato: 60 cm
		2	Capa drenante + lámina filtrante: 4 cm + 0,1 cm	
		3	XPS 3: material aislante de 30 cm	
		4	Lámina antiraíces: 0,40 cm	
		5	Lámina impermeable EPDM: 0,12 cm	
		6	Mortero de cemento de regulación: 1,50 cm	
		7	Hormigón de áridos ligeros: 10 cm	
		8	Forjado tipo: unidireccional con entrevigado de yeso sin capa de compresión: 20 cm <sup>2 3</sup>	
	9	Cámara de aire: 50 cm		
<i>Interior</i>	10	Placa de yeso para techo: 1,50 cm		

Tabla III.25. Sistema constructivo de cubierta del modelo C tras rehabilitación.

A continuación, se determinan las características concretas de los materiales necesarios para realizar estos sistemas constructivos (Tabla III.27). Los datos se han obtenido de la normativa vigente, fichas técnicas, catálogos de soluciones constructivas e investigaciones previas que han realizado simulaciones similares en EnergyPlus y OpenStudio. Al igual que en el caso de los materiales indicados en la Tabla III.13, se considera un factor de absorción térmico de 0,9, de absorción solar de 0,6 y de absorción de espectro visible de 0,6, de acuerdo con la bibliografía consultada<sup>13</sup>.

13 Muñoz, V.B. 2016.



Las Tablas III.28 y III.29 indican los datos necesarios para la modelización térmica de las ventanas, tanto del vidrio como del marco. La rehabilitación propuesta consiste en substituir el vidrio monolítico por un vidrio con cámara 4+16 (90% Argón)+4. Se aplican tratamientos de control solar y baja emisividad ( $\epsilon=0,01$ )<sup>14</sup>. El marco de aluminio sin RPT se sustituye por un marco de PVC de 3 cámaras con RPT.

Los datos relacionados con las capas de substrato y vegetación tanto de la cubierta ajardinada extensiva como intensiva se describen en la Tabla III.30. En EnergyPlus y OpenStudio se puede crear un material denominado *Roof Vegetation Material*. Este material incluye, en primer lugar, los parámetros relacionados con la vegetación y, posteriormente, los parámetros relacionados con el substrato. Los datos necesarios para modelar la capa de vegetación se han obtenido de investigaciones que han modelado cubiertas ajardinadas en EnergyPlus y OpenStudio con características de la vegetación similares a las empleadas en esta investigación (especies tipo *sedum* para el modelo B y tipo gramíneas de mayor altura para el modelo C). Respecto al substrato, los datos necesarios se han obtenido de las fichas técnicas de los productos empleados en las maquetas (Zincoterra “Floral” y Zincoterra “Jardín”) e investigaciones previas que aportan valores contrastados y fiables.

<b>Fachada</b>	Fachada CTE: $U_{lim} = 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>13</sup>	
<b>Medianera</b>	Medianera CTE: $U_{lim} = 0,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>13</sup>	
<b>Solera</b>	Solera CTE: $U_{lim} = 0,69 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>13</sup>	
<b>Puerta de acceso*</b>	Puerta CTE: $U_{lim} = 5,70 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>13</sup>	
<b>Ventanas (vidrio + marco)</b>	Ventanas CTE: $U_{lim} = 2 \text{ W/m}^2\text{K}$ <sup>13</sup>	Vidrio 4+16+4 <sup>14</sup>
		PVC 3 cámaras <sup>4</sup>

\* La puerta de acceso diseñada en el modelo de referencia presentaba una transmitancia de  $4,20 \text{ W/m}^2\text{K}$ , por lo que ya cumplía con la  $U_{lim}$  establecida por la normativa. Es el único elemento de la envolvente que no se va a modificar tras la rehabilitación.

Tabla III.26. Transmitancias térmicas límite ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ) de los elementos de la envolvente a rehabilitar.

MATERIALES				
Nombre	Espesor (m)	Conductividad ( $\text{W/mK}$ )	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	Calor específico ( $\text{J/kgK}$ )
Capa drenante+filtrante	0,041	0,273 <sup>4</sup>	900 <sup>4 16</sup>	2200 <sup>4 15</sup>
Grava	0,06	2,00 <sup>4</sup>	2200 <sup>4</sup>	1180 <sup>4</sup>
Lámina antiraíces	0,001	0,33 <sup>4</sup>	920 <sup>4</sup>	2200 <sup>4</sup>
Lámina impermeable EPDM	0,0012	0,25 <sup>4</sup>	1150 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Mortero de cemento regulación	0,015	1,30 <sup>4</sup>	1900 <sup>4</sup>	1000 <sup>4</sup>
Placa yeso techo	0,015 <sup>17</sup>	0,25 <sup>17</sup>	900 <sup>2</sup>	1000 <sup>2</sup>
XPS 8	0,08	0,033 <sup>4</sup>	32 <sup>18</sup>	1450 <sup>18</sup>
XPS 6	0,065	0,033 <sup>4</sup>	32 <sup>18</sup>	1450 <sup>18</sup>
XPS 3	0,03	0,033 <sup>4</sup>	32 <sup>18</sup>	1450 <sup>18</sup>
Fachada CTE	0,10	0,038 <sup>13</sup>	750 <sup>19</sup>	1000 <sup>19</sup>
Medianera CTE	0,10	0,075 <sup>13</sup>	750 <sup>19</sup>	1000 <sup>19</sup>
Solera CTE	0,10	0,069 <sup>13</sup>	750 <sup>19</sup>	1000 <sup>19</sup>

Tabla III.27. Propiedades de los materiales empleados para la formación de los sistemas constructivos en rehabilitación.

MATERIALES PARA ACRITALAMIENTO DE VENTANAS		
Nombre	Transmitancia ( $\text{W/m}^2\text{K}$ )	Factor solar
Vidrio 4+16+4	1,00 <sup>14</sup>	0,38 <sup>14</sup>

Tabla III.28. Propiedades de los materiales empleados para acristalamiento de ventanas en rehabilitación.

14 Saint-Gobain. 2022.



MATERIALES PARA MARCO DE VENTANAS				
Nombre	Ancho marco (m)	Proyección exterior marco (m)	Proyección interior marco (m)	Transmitancia (W/m <sup>2</sup> K)
PVC 3 cámaras	0,047	0,005	0,005	1,80 <sup>4</sup>

Tabla III.29. Propiedades de los materiales empleados para marco de ventanas en rehabilitación.

MATERIALES PARA VEGETACIÓN EN CUBIERTAS		
Datos de la vegetación	Ajardinamiento extensivo	Ajardinamiento intensivo
Altura (m)	0,10 <sup>20</sup>	0,40 <sup>20</sup>
LAI	0,80 <sup>20</sup>	5 <sup>20</sup>
Reflectancia de la hoja – albedo	0,22 <sup>20</sup>	0,30 <sup>20</sup>
Emisividad de la hoja	0,95 <sup>20</sup>	0,95 <sup>20</sup>
Resistencia estomática mínima (s/m)	300 <sup>20</sup>	120 <sup>20</sup>
Datos del sustrato		
Nombre de la capa de sustrato	Sustrato 10 cm	Sustrato 60 cm
Espesor (m)	0,10	0,60
Conductividad del sustrato seco (W/mK)	0,435 <sup>21</sup>	0,435 <sup>21</sup>
Densidad del sustrato seco (kg/m <sup>3</sup> )	940 <sup>21</sup>	940 <sup>21</sup>
Calor específico del sustrato seco (J/kgK)	1420 <sup>21</sup>	1420 <sup>21</sup>
Absorción térmica	0,90	0,90
Absorción solar	0,70 <sup>22</sup>	0,70 <sup>22</sup>
Absorción del espectro visible	0,75	0,75
Contenido volumétrico de humedad de saturación de la capa de sustrato	0,40 <sup>23</sup>	0,50 <sup>24</sup>
Contenido volumétrico de humedad residual de la capa de sustrato	0,01	0,01
Contenido volumétrico de humedad inicial de la capa de sustrato	0,10	0,10

Tabla III.30. Propiedades de los materiales empleados para para vegetación en cubiertas.

### TIPOS DE ESPACIOS

El último cambio tan solo se aplica en el caso de rehabilitar toda la envolvente de la vivienda (no cuando se mejora solo la transmitancia térmica de la cubierta). En este caso, al mejorar los sistemas constructivos de toda la envolvente térmica y reducir los puntos débiles por los que se puedan producir filtraciones de aire, este valor disminuirá de 0,7 ACH a 0,1 ACH. En este caso en el apartado *Space Infiltration Design Flow Rates* se sustituirán las filtraciones del modelo de referencia por las nuevas filtraciones de 0,1 ACH. En este caso, cada tipo de espacio se relacionará con estas filtraciones, quedando como se indica en la Tabla III.31.



TIPOS DE ESPACIOS	ESTANCIAS DE LA VIVIENDA	FILTRACIONES (ACH)
Tipo Salón	Salón	0,10 <sup>11</sup>
Tipo Cocina	Cocina	0,10 <sup>11</sup>
Tipo Baño	Baño	0,10 <sup>11</sup>
Tipo Dormitorio principal	Dormitorio doble principal	0,10 <sup>11</sup>
Tipo Dormitorio individual	Dormitorio individual 1 Dormitorio individual 2	0,10 <sup>11</sup>
Tipo Estudio	Estudio	0,10 <sup>11</sup>
Tipo Pasillo	Pasillo	0,10 <sup>11</sup>

Tabla III.31. Tipos de espacio relacionados con las estancias de la vivienda y filtraciones de aire (ACH) en rehabilitación.



## ANEXO IV. GRÁFICAS ORIGINALES DE ENERGYPLUS Y OPENSTUDIO

### IV.1 GRÁFICAS DEL APARTADO 7.3.2

En el siguiente apartado se adjuntan las gráficas/tablas originales obtenidas en el programa EnergyPlus-OpenStudio, que han sido redibujadas para el apartado 7.3.2.

Zone	Unmet Htg (hr)	Unmet Htg - Occ (hr)	< 56 (F)	56-61 (F)	61-66 (F)	66-68 (F)	68-70 (F)	70-72 (F)	72-74 (F)	74-76 (F)	76-78 (F)	78-83 (F)	83-88 (F)	>= 88 (F)	Unmet Clg (hr)	Unmet Clg - Occ (hr)	Mean Temp (F)
ZONA TERMICA 1	0	0	0	0	519	1101	656	2121	738	680	2610	331	4	0	0	0	72.1 (F)
ZONA TERMICA 2	0	0	0	0	12	585	512	888	688	659	4213	797	376	30	0	0	75.2 (F)
ZONA TERMICA 3	0	0	0	0	943	1091	611	2420	612	643	2273	167	0	0	0	0	71.2 (F)
ZONA TERMICA 4	0	0	0	0	30	896	664	2185	825	615	2797	737	11	0	0	0	73.2 (F)
ZONA TERMICA 5	0	0	0	0	0	202	679	1479	1204	897	3510	785	4	0	0	0	74.4 (F)

Figura IV.1. Horas pasadas en cada rango de temperatura durante el año simulado y temperatura media anual (°F), para cada zona térmica. Tabla redibujada 7.29.

**ANEXO V. GLOSARIO DE TÉRMINOS TRADUCIDOS**

A continuación, se traducen y/o describen los diferentes términos de otras lenguas empleados a lo largo de esta tesis.

<b>TÉRMINO</b>	<b>TRADUCCIÓN Y/O DESCRIPCIÓN</b>
<i>12 Green Guidelines</i>	12 Pautas Ecológicas.
<i>ActivityLevel</i>	Nivel de actividad.
<i>Air Changes per Hour</i>	Renovaciones de aire por hora.
<i>Best Management Practices</i>	Mejores Prácticas de Gestión.
<i>Bosco Verticale</i>	Jardín Vertical.
<i>Building Research Establishment Environmental Assessment Method</i>	Método de Evaluación Medioambiental del Organismo de Investigación de la Construcción.
<i>Building Technologies Office</i>	Oficina de Tecnología Arquitectónica.
<i>China Development Bank Capital</i>	Capital del Banco de Desarrollo de China.
<i>Coco-peat</i>	Turba de coco.
<i>Controlled Release Fertilizer</i>	Fertilizante de Liberación Controlada.
<i>Cool roof</i>	Cubierta reflectante.
<i>Data-logger</i>	Registrador de datos.
<i>Department of Agriculture for the United States</i>	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
<i>Dimensionless</i>	Adimensional.
<i>Downlight</i>	Luminaria empotrada que dirige la luz hacia abajo.
<i>East Campus of the Ogden International School</i>	Campus este de la Escuela Internacional de Ogden.
<i>Eco-friendly</i>	Respetuoso con el medio ambiente.
<i>Ecoroofs</i>	Cubiertas respetuosas con el medio ambiente.
<i>Ekostaden</i>	Ecociudad/Ecovecindario.
<i>Embodied Carbon</i>	Emisiones de CO <sub>2</sub> Incorporadas.
<i>Embodied Energy</i>	Energía Incorporada.
<i>Energy Hub</i>	Núcleo de Energía.
<i>EPDM Roofing Association</i>	Asociación de cubiertas EPDM.
<i>Fast All Season Soil Strength</i>	Resistencia del suelo, para todas las estaciones.
<i>Flagships</i>	Iniciativas emblemáticas.
<i>Florida University</i>	Universidad de Florida.
<i>Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau</i>	Sociedad de Investigación para el Desarrollo del Paisaje y el Paisajismo.
<i>Glass U-Factor</i>	Factor de U (transmitancia térmica) del conjunto de vidrio+marco de las ventanas.
<i>Green blue roof</i>	Cubierta ajardinada con una capa específicamente destinada a la retención de agua.
<i>GREen ENvelope System</i>	Sistema de envolvente verde.



<i>Green Globes</i>	Globos Verdes (pero esta certificación energética se conoce, en España, con su nombre original en inglés).
<i>Green Permit Program</i>	Programa de Permisos Verdes.
<i>Green Roof Ecosystems</i>	Ecosistemas de Cubiertas Ajardinadas.
<i>Healthy Communities</i>	Comunidades Saludables.
<i>Heating-Ventilation-Air Conditioning</i>	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado.
<i>Home Energy Rating Systems</i>	Sistema de clasificación de energía doméstica.
<i>Ideal Air Loads System</i>	Sistema de Cargas de Aire Ideal.
<i>Korea Institute of Civil engineering and building Technology</i>	Instituto Coreano de Ingeniería Civil y Tecnología de la Construcción.
<i>Korea UNESCO Center</i>	Centro de la UNESCO de Corea.
<i>L'Architecture Vivante</i>	Arquitectura Viva.
<i>Landscape Park Duisburg Nord</i>	Parque Paisajístico Duisburg Norte.
<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>	Líder en Eficiencia Energética y Diseño Sostenible.
<i>Leaf Area Index</i>	Índice de Área Foliar.
<i>Living Building Challenge</i>	Desafío del Edificio Vivo.
<i>Maison Particulière</i>	Casa Privada.
<i>Masdar Institut</i>	Instituto Masdar.
<i>Mega or Million British Thermal Unit</i>	Un millón de Unidades Térmicas Británicas.
<i>Milano Clever Cities</i>	Milán Ciudades Inteligentes.
<i>Multi-course</i>	De varias capas: sistema de cubierta ajardinada con distintos tipos de sustrato, estratificados, estando uno de ellos optimizado para el drenaje.
<i>National Research Council of Canada</i>	Consejo Nacional de Investigación de Canadá.
<i>Open Gardens</i>	Jardines Abiertos/Accesibles.
<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>	Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos.
<i>Phase Change Materials</i>	Materiales de Cambio de Fase.
<i>Plant Available Water</i>	Agua Disponible para la Vegetación.
<i>Promenade architecturale</i>	Paseo arquitectónico.
<i>Quinto Alçado do Porto</i>	Quinto Alzado de Oporto.
<i>Renovate</i>	Renovar.
<i>Retention roof</i>	Cubierta retenedora de agua.
<i>Roof Farm</i>	Cubierta granja.
<i>Roof Vegetation Material</i>	Material de vegetación en cubierta.
<i>Rooftop Catalogue</i>	Catálogo de cubiertas.
<i>Rotterdamse Dakendagen</i>	Jornadas de cubiertas de Róterdam.
<i>ScheduleAndDesignLevel</i>	Diseño en base a un horario y un nivel de precipitaciones anuales.
<i>Seoul Library</i>	Biblioteca de Seúl.
<i>Siemens Middle East Headquarters</i>	Sede de Siemens en Oriente Medio.
<i>Single-course</i>	De una capa: sistema de cubierta ajardinada con un único tipo de sustrato.





<i>Site:Precipitation</i>	Emplazamiento: Precipitaciones.
<i>Space Infiltration Design Flow Rates</i>	Tasa de diseño de flujo de infiltraciones en los espacios.
<i>SummerDesignDay</i>	Día de diseño de verano (cálido).
<i>Temperature</i>	Temperatura.
<i>Theorie du toit-jardin</i>	Teoría del jardín en la cubierta.
<i>Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts</i>	Herramienta para la reducción y evaluación de impactos químicos y otros impactos ambientales.
<i>U-Factor no Film</i>	Factor de U (transmitancia térmica) sin considerar las capas de aire exterior e interior.
<i>U-Factor with Film</i>	Factor de U (transmitancia térmica) considerando las capas de aire exterior e interior.
<i>United Nations Environment Programme</i>	Organización de las Naciones Unidas Programa para el Medio Ambiente.
<i>United States Department of Energy</i>	Departamento de Energía de los Estados Unidos de América.
<i>Vertical Greenery Module System</i>	Sistema Modular de Revestimientos Verticales Verdes o Ajardinados.
<i>Waste European Catalogue</i>	Catálogo Europeo de Residuos.
<i>Water Holding Capacity</i>	Capacidad de Retención de Agua.
<i>WinterDesignDay</i>	Día de diseño de invierno (frío).
<i>Worcester Polytechnic Institute</i>	Instituto Politécnico de Worcester.
<i>World Trade Organization</i>	Organización Mundial del Comercio.
<i>Zone Equipment</i>	Equipo de climatización de cada zona térmica.



Universitat Politècnica de València  
Escola Tècnica Superior d'Arquitectura

