



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado Tecnología de la computación e
ingeniería ambiental

La cubierta ecológica en las regiones semiáridas del
Mediterráneo. Eficiencia energética y viabilidad de las
cubriciones vegetales sin aporte de agua.

Autor:

Joaquín Ruiz Piñera

Director:

Dr. D. Francisco Sánchez Medrano

Murcia, abril de 2020



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO
Programa de Doctorado Tecnología de la computación e
ingeniería ambiental

La cubierta ecológica en las regiones semiáridas del
Mediterráneo. Eficiencia energética y viabilidad de las
cubriciones vegetales sin aporte de agua.

Autor:

Joaquín Ruiz Piñera

Director:

Dr. D. Francisco Sánchez Medrano

Murcia, abril de 2020



UCAM

UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE MURCIA

AUTORIZACIÓN DEL DIRECTOR DE LA TESIS PARA SU PRESENTACIÓN

El Dr. D. Francisco Sánchez Medrano como Director de la Tesis Doctoral titulada “La cubierta ecológica en las regiones semiáridas del Mediterráneo. Eficiencia energética y viabilidad de las cubriciones vegetales sin aporte de agua” realizada por D. Joaquín Ruiz Piñera en el Departamento de Urbanismo, **autoriza su presentación a trámite** dado que reúne las condiciones necesarias para su defensa.

Lo que firmo, para dar cumplimiento a los Reales Decretos 99/2011, 1393/2007, 56/2005 y 778/98, en Murcia a 08 de Junio de 2020.

UCAM



EIDUCAM
Escuela Internacional
de Doctorado

**La cubierta ecológica en las regiones semiáridas del Mediterráneo.
Eficiencia energética y viabilidad de las cubriciones vegetales sin aporte de
agua.**

RESUMEN

Durante las últimas décadas el interés por la ecología y la eficiencia energética en la Arquitectura ha experimentado un espectacular aumento, especialmente en las sociedades desarrolladas.

Las cubiertas o azoteas verdes constituyen una solución constructiva percibida generalmente como un elemento sostenible y deseable en la arquitectura, aportando un buen número de ventajas ecológicas y económicas a los edificios y a su entorno.

Aunque los beneficios cualitativos de estas cubriciones vegetales son bien conocidos, la falta de un análisis integral desde el punto de vista cuantitativo, supone todavía un reto para su clasificación y calificación.

Por un lado, numerosos estudios avalan la capacidad de este tipo de cubiertas de disminuir el gasto energético de los edificios tanto en régimen de verano como de invierno y su efecto de atemperación del ambiente exterior del edificio. A su vez, otras publicaciones exploran separadamente el consumo de agua, crecimiento y supervivencia de múltiples especies vegetales para diversas tipologías constructivas.

Sin embargo, los estudios que relacionan el ahorro energético de una determinada solución constructiva con su consumo de agua o viabilidad en climas más áridos son muy escasos o parciales.

Además, esta tipología y su investigación se han desarrollado más profusamente en regiones frías, donde la climatología y, sobre todo, la disponibilidad de agua favorecen el crecimiento de la vegetación.

En regiones cálidas y secas como la Mediterránea, donde la disponibilidad de agua es muy limitada y su uso conlleva un alto consumo energético, la selección de soluciones adaptadas a este entorno se hace especialmente importante.

Por tanto, el objetivo de esta tesis es determinar, aquellas tipologías constructivas y selección de especies vegetales mejor adaptadas a los climas semiáridos del Mediterráneo.

Para ello, se analizarán los beneficios cuantitativos en términos de reducción del consumo de energía junto con las necesidades hídricas de varias soluciones adaptadas al entorno.

Las conclusiones de este estudio llevarían a establecer un nuevo método de clasificación de las cubiertas vegetales para el clima Mediterráneo semiárido, en función de su eficiencia hidro-energética global.

Palabras clave: Arquitectura Bioclimática, Mediterráneo, Cubiertas Verdes, Flora Autóctona, Eficiencia Energética, Eficiencia Hídrica.

The ecological roofs for the semi-arid Mediterranean regions. Energy efficiency and viability of non irrigated green roof coverings.

ABSTRACT

During the last decades, interest in ecology and energy efficiency in Architecture has exponentially increased, particularly in more developed societies.

Green or planted roofs are generally perceived as a sustainable and desirable architectural feature, contributing with a number of ecological, economic and energy advantages to buildings and the Environment.

Although the qualitative benefits of these green coverings are well known, the lack of a comprehensive analysis, from a quantitative point of view, results in a challenge towards classifying them.

On the one hand, many studies show the capacity these roofing solutions have to lower the air conditioning energy consumption of buildings, both in winter and summer periods and the cooling effects on the built Environment. On the other, several researches separately explore the water consumption, growth and survival rates of multiple vegetation species under different roof typologies.

However, there are very few studies linking the Energy efficiency of a specific green roof type with its water usage and viability, particularly in drier climates.

Moreover, this building feature and its investigation has been primarily developed in cooler regions, where the climate and water availability favour the natural growth of vegetation.

As a result, in the Mediterranean basin and similar warm and dry areas, where water availability is very limited and its consumption generates a high energy usage, the selection of climate adapted solutions becomes fundamental.

Therefore, the main objective of this Thesis is to determine which green roof typologies are best suited for the semi-dry Mediterranean climate.

In order to achieve it, a quantitative analysis of the energy and water efficiency benefits of a selection of climate adapted green roofs solutions will be carried out.

The conclusions of this study will serve as a basis to establish a new classification method for truly ecological green roofs suited for the Mediterranean semi-arid climate, as a function of their global “watergy” efficiency.

Keywords: Bioclimatic Architecture, Mediterranean, Green Roofs, Native plants, Energy efficiency, Water efficiency.

AGRADECIMIENTOS

Si hay algo que demuestra un trabajo de investigación de este recorrido es que realizarlo en solitario no sólo carece de ningún cometido práctico, sino que se hace particularmente arduo. Por ello, quisiera agradecer su apoyo y colaboración a todos los que han participado de una forma u otra en la consecución de esta meta. Especialmente:

A mi director, el Doctor Francisco Sánchez Medrano, por aportar toda su experiencia y rigor científico a este trabajo junto con su mejor disposición y el ánimo constante sin los que no hubiera sido posible realizarlo.

A nuestro compañero Rubén Megías, por su inestimable contribución a la fase experimental de este trabajo y por aportar su positividad en todo momento.

Al Doctor Pedro Sánchez Gómez y su equipo de trabajo, por prestarse tan amablemente a colaborar en la selección de especies vegetales autóctonas y su recogida en viveros o en la propia naturaleza.

A todos mis compañeros de trabajo de los últimos años, por cubrir mis ausencias durante los prolongados períodos de “encierro” investigador.

A mis amigos y compañeros de los cursos de doctorado, de los que hace ya algunos años, por su ejemplo, apoyo y ánimo constante.

A mi amiga y maestra, la Doctora Linda Toledo, por su incondicional sonrisa y compartir conmigo el interés por la arquitectura ecológica y eficiente.

A mis padres y hermanos, por estar ahí siempre y animarme a aprender y trabajar en lo que me apasiona.

A Pepa, por todo. Por su paciencia, sacrificio y su ayuda en la redacción de este trabajo y también por ser “fuertemente recomendada”.

“No hay camino real para la geometría”
Euclides (ca. 325 a. C.-ca. 265 a. C.).

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE

AUTORIZACIÓN DE LOS DIRECTORES	
AGRADECIMIENTOS	
ÍNDICE GENERAL	
ÍNDICE DE FIGURAS DE TABLAS Y DE ANEXOS	19
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	31
1.1. INTRODUCCIÓN	
1.2. LA CUBIERTA ECOLÓGICA	
1.3. BENEFICIOS CUALITATIVOS DE LAS CUBIERTAS VERDES	
1.3.1. Mejoras ecológicas	
1.3.2. Filtración de la polución ambiental	
1.3.3. Atenuación de descarga de aguas pluviales a las redes.	
1.3.4. Reducción de temperatura en las ciudades. Adaptación al cambio climático	
1.3.5. Mejora de la temperatura en edificios. Eficiencia energética.	
1.3.6. Protección de la cubierta	
1.3.7. Atenuación del ruido	
1.3.8. Aumento del valor de los edificios	
1.3.9 Cualidades estéticas	
1.4. HISTORIA DE LAS AZOTEAS VEGETALES	
II ESTADO DE LA CUESTIÓN	69
III METODOLOGÍA	77
3.1. OBJETIVOS	
3.2. INTRODUCCIÓN A LAS CUBIERTAS VERDES	
3.3. PARÁMETROS CLIMÁTICOS	
3.4. GASTO ENERGÉTICO DEL AGUA	
3.5. PARÁMETROS PARA SELECCIONAR LA CUBIERTA ÓPTIMA	

3.6. FASE EXPERIMENTAL	
3.7. CÁLCULO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	
3.8. CÁLCULO DE EFICIENCIA HÍDRICA	
3.9. SET-UP EXPERIMENTO REAL. MATERIALES Y MÉTODOS	
3.10. PROPUESTA DE FÓRMULA DE HIDRO-EFICIENCIA	
IV CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA.....	91
4.1. INTRODUCCIÓN	
4.2. CLASIFICACIÓN DE KÖPPEN Y SUS VARIANTES	
4.2.1. Clima B - Seco - Árido y Semiárido	
4.2.2. Clima Csa – Templado de verano seco y cálido (Mediterráneo)	
4.3. MODIFICACIONES DEL MODELO KÖPPEN	
4.4. CLASIFICACIÓN DE BUDYKO	
4.5. ZONIFICACIONES VEGETALES	
4.6. DATOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS DE LA CIUDAD DE MURCIA	
V HUELLA ENERGÉTICA DEL AGUA.....	111
5.1. PROBLEMÁTICA DEL USO DEL AGUA EN REGIONES SEMI-ÁRIDAS	
5.2. CÓMO SE EVALÚA EL USO DEL AGUA. HUELLA HÍDRICA	
5.2.1. Agua para sector primario y agua uso doméstico	
5.2.2. Concepto de la Huella Hídrica	
5.3. HUELLA ENERGÉTICA DEL CICLO DEL AGUA	
5.3.1. Consumo de energía para el suministro de agua urbana	
5.3.2. Captación y transporte	
5.3.3. Potabilización	
5.3.4. Distribución urbana	
5.3.5. Ciclo total	
5.4. INTENSIDAD ENERGÉTICA DEL CICLO HÍDRICO EN ESPAÑA	
5.5. HUELLA ENERGÉTICA DEL AGUA EN LA REGIÓN DE MURCIA	
VI CUBIERTA VERDE ÓPTIMA: CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	127
6.1. INTRODUCCIÓN	
6.2. CLASIFICACIÓN ACTUAL DE CUBIERTAS VEGETALES	
6.2.1. Cubiertas verdes Intensivas	
6.2.2. Cubiertas verdes Extensivas	
6.2.3. Cubiertas verdes mixtas o semi-extensivas	
6.3. SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN PARA CUBIERTAS VERDES	

6.3.1. Introducción	
6.3.2. Criterios de selección	
6.3.3. Revisión bibliográfica selección vegetal	
6.3.4. Elección para nuestro experimento	
VII ESTUDIO CUANTITATIVO: ENERGÍA Y AGUA175
7.1. AHORRO DE ENERGÍA	
7.1.1. Color y forma de la vegetación	
7.1.2. Influencia del aislamiento térmico en zonas cálidas	
7.1.3. Definición del edificio tipo	
7.1.4. Cálculos energéticos	
7.1.5. Influencia de las cubiertas verdes en edificios sin aislamiento	
7.1.6. Influencia de las cubiertas verdes en edificios muy aislados	
7.1.7. Resultados y discusión	
7.2. CONSUMO DE AGUA	
7.2.1. Revisión de literatura: experimentos con riego	
7.2.2. Revisión de literatura: experimentos sin riego	
7.2.3. Factores socioeconómicos	
7.2.4. Objetivos de la fase experimental	
7.2.5. Primer Experimento: de 05 de junio a 13 de septiembre de 2017	
7.2.6. Segundo Experimento: de 25 de octubre 2017 a 30 de agosto 2018	
7.2.7. Tercer Experimento: de 30 de agosto a 28 de diciembre de 2018	
7.2.8. Resultados y discusión	
7.3. ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÍA / AGUA	
7.3.1. Resumen de resultados teóricos y empíricos	
7.3.2. Fórmula propuesta: Índice de Eficiencia Hidro-Energética	
7.3.3. Propuesta de Clasificación Hidro-Energética para las cubiertas ecológicas	
7.3.4. Cálculo de Eficiencia Hidro-Energética de la cubierta propuesta	
VIII CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN253
8.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
8.2. FÓRMULA PROPUESTA: ÍNDICE DE EFICIENCIA HIDRO-ENERGÉTICA	
8.3. CLASIFICACIÓN HIDRO-ENERGÉTICA DE LAS CUBIERTAS ECOLÓGICAS	
CAPÍTULO IX: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS267
CAPÍTULO X: ANEXOS285

ÍNDICE DE FIGURAS, DE TABLAS Y DE ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.01. ¿Pueden las cubiertas ecológicas devolver a la naturaleza la huella ocupada por los edificios?

Figura 1.02. Fotografía aérea de la ciudad de Murcia (2018).

Figura 1.03. Recreación de la ciudad de Beirut con sus tejados convertidos en cubiertas verdes.

Figura 1.04. Azotea vegetal intensiva de la empresa Zinco en el Campus Nacional de Arqueología de Israel.

Figura 1.05. Cubierta verde extensiva en la azotea de un edificio de una planta en Alicante.

Figura 1.06. Cubierta ecológica semi-extensiva diseñada por Clements, A. M. para el Edificio del Tesoro, en Atenas.

Figura 1.07. Sepulcro de corredor de Newgrange, Irlanda. Fechado en el 2300 a.C

Figura 1.08. Cubierta vegetal en una vivienda en Tanzania.

Figura 1.09. Recreación del estado original del todavía existente zigurat de Nanna (c. 2100 a.C.) en la antigua ciudad sumeria de Ur, actual Irak.

Figura 1.10. Ilustración de Sheldon, C.M. (1924). *Bella recreación de los Jardines colgantes de Babilonia*. The New York Public Library.

Figura 1.11. Sección ilustrativa de los Jardines Colgantes de Babilonia según las descripciones del arqueólogo Robert Koldewey's.

Figura 1.12. Restos arqueológicos de una cubierta ajardinada en la Villa de los Misterios 79 d.C., en las afueras de Pompeya.

Figura 1.13. Jardines en una cubierta de la abadía de Mont-Saint-Michel.

Figura 1.14. Vista de la Torre dei Giunigi. Lucca.

Figura 1.15. Recreación de vivienda de turba Eiríksstaðir en Haukadalur, Islandia.

Figura 1.16. Vivienda de turba con cubierta vegetal en las llanuras de Estados Unidos c.1896.

Figura 1.17. Cubierta jardín en el American Theater en Broadway, Nueva York. 1880.

Figura 1.18. Visualización y vista del Rockefeller Center, Nueva York.

Figura 1.19. Sección del Museo de Ahmedabad de Le Corbusier donde se puede apreciar la cubierta inundada con vegetación acuática que se proyectó.

Figura 1.20. Cubierta verde inclinada en la Exposición Federal del Jardín en Berlín. Año 1985.

Figura 3.01. Imágenes del proceso inicial de instalación de las láminas drenantes en los módulos experimentales.

Figura 3.02. Imágenes del proceso inicial de instalación del sustrato y la vegetación en los módulos experimentales.

Figura 4.01. Gráficas climáticas originales de Köppen (1936) para diferentes localizaciones y su comparación con la ciudad de Murcia.

Figura 4.02. Mapa climático mundial de Köppen-Geiger.

Figura 4.03. Cambios anuales del límite de Clima B según el sistema de Köppen. Sombreados aparecen los climas que no han cambiado de posición ningún año.

Figura 4.04. Mapa Digital Mundial de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con medias mensuales CRU TS 2.1 de temperatura y VASCLIMO v1.1 de precipitación en el período 1951 a 2000 en un grid regular de latitud/longitud.

Figura 4.05. Mapa Digital Mundial de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de CRU TS 3.10 en el período 1961 a 1990 en un grid regular de latitud/longitud de 0.5°.

Fig. 4.06. Mapa Digital Mundial de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de temperatura y precipitación GHCN v2.0 (Global Historical Climatology Network) en todo el período 1800-2006.

Fig. 4.07. Mapa Digital de Europa de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con medias mensuales CRU TS 2.1 de temperatura y VASCLIMO v1.1 de precipitación en el período 1951 a 2000 en un grid regular de latitud/longitud.

Fig. 4.08. Mapa Digital de Europa de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de CRU TS 3.10 en el período 1961 a 1990 en un grid regular de latitud/longitud de 0.5°.

Fig. 4.09. Mapa Digital de Europa de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de temperatura y precipitación GHCN v2.0 (Global Historical Climatology Network) en todo el período 1800-2006.

Fig. 4.10. 2070-2100 Mapa de Köppen-Geiger basado en la composición de las proyecciones climáticas de los 32 modelos de CMIP5.

Figura 4.11. Clasificación climática de 22 ciudades de referencia según Köppen. Las líneas de color representan las ecuaciones que generan la división climática.

- Figura 4.12. Clasificación climática de 22 ciudades de referencia según Trewartha. Las líneas de color representan las ecuaciones que generan la división climática.
- Figura 4.13. Zonificación botánica en función de *Id.*
- Figura 4.14. Mapa según el Índice radiativo de aridez *Id.*
- Figura 4.15. Mapa de Vegetación Potencial de Europa a partir de los datos de Ramankutty, N. Foley, J.A. 1999.
- Figura 5.01. Mapa mundial de Estrés Hídrico.
- Figura 5.02. Mapa de la Huella Hídrica media per cápita (m³/cápita/año).
- Figura 6.01. Sección transversal de una cubierta vegetal tipo.
- Figura 6.02. Ejemplar de *Sedum sediforme* en un entorno rocoso en la sierra de Ricote, Región de Murcia.
- Figura 6.03. Fotografía de *Enneapogon Persicus*.
- Figura 6.04. Ejemplares de tomillo (izq.) y sopaenvino (der.) en las sierras litorales de Águilas.
- Figura 6.05. La diversidad morfológica y cromática del hábitat natural de las sierras litorales de Águilas, Murcia.
- Figura 6.06. Cubierta vegetal de la Academy of Sciences de California, diseñado por el arquitecto Renzo Piano (RPBW).
- Figura 6.07. Riego manual en una cubierta vegetal en un edificio de oficinas sobre el río Támesis.
- Figura 6.08. Bandejas de alveolos con cepellones de diversas especies provenientes de vivero para su trasplante a las cubiertas experimentales
- Figura 6.09. Ejemplar de *Helichrysum (stoechas)* en floración en la sierra de Ricote.
- Figura 6.10. Capa de drenaje (izq.) Diadrain 40 y retenedora de agua VLS-500 (der.) de la marca Diadem.
- Figura 6.11. Mapa de las visitas de campo realizadas en la Región de Murcia durante los meses de marzo y abril de 2017.
- Figura 6.12. Piso de Meseta (Mesomediterráneo): cobertura de matorral xerófilo en las sierras y pasillos subbéticos de Ricote, dominado por romeros, tomillos, aulagas y en los sectores bajos por el esparto y el albardín. Visita de campo realizada el 26/03/2017.
- Figura 6.13. Piso Litoral (Inframediterráneo): Vegetación arbustiva y de matorral mediterráneo en el Cuartel del Ciscar, perteneciente a las sierras litorales del Lomo de Bas – Rambla de las Moreras. Visita de campo realizada el 02/04/2017.

Figura 6.14. Piso Sublitoral (Termomediterráneo): matorrales xerófilos constituidos especialmente por atochares, romerales y tomillares en un paisaje característico de barrancos y ramblas de margas y areniscas en la cuenca del río Pliego cerca de Mula. Visita de campo realizada el 03/04/2017.

Figura 7.01. Esquema del balance térmico de una cubierta verde.

Figura 7.02. Tipo A. Tradicional sin aislamiento.

Figura 7.03. Tipo B. EcoRoof sin aislamiento.

Figura 7.04. Secciones Constructivas Edificios Tipo A (izq.) y Tipo B (der.).

Figura 7.05. Diagramas Glaser de cubierta convencional (izq.) y cubierta con EcoRoof (der.) para el mes de enero.

Figura 7.06. Consumos del edificio tipo A, con cubierta convencional, desglosados por servicio.

Figura 7.07. Consumos del edificio tipo B, con cubierta EcoRoof, desglosados por servicio.

Figura 7.08. Comparación de demandas energéticas para los edificios tipo A y B.

Figura 7.09. Balance energético por cerramiento y ventilación en edificio tipo A.

Figura 7.10. Balance energético por cerramiento y ventilación en edificio tipo B.

Figura 7.11. Edificio tipo A durante el día 15 de julio.

Figura 7.12. Edificio tipo B durante el día 15 de julio.

Figura 7.13. Mejoras térmicas durante el día 15 de julio de un edificio con cubierta verde respecto al edificio base sin aislamiento.

Figura 7.14. Reducción de la necesidad de enfriamiento durante el 15 de julio.

Figura 7.15. Diagramas Glaser de cubierta invertida con aislamiento (izq.) y misma configuración con EcoRoof (der.).

Figura 7.16. Consumos del edificio tipo C, con cubierta convencional aislada.

Figura 7.17. Consumos del edificio tipo D, con cubierta EcoRoof aislada.

Figura 7.18. Comparación de demandas energéticas para los edificios tipo C y D.

Figura 7.19. Demandas de calefacción, refrigeración y climatización para las diferentes soluciones adoptadas.

Figura 7.20. Imagen de las cuatro probetas tras su plantación el 7 de junio de 2017, ubicadas en el exterior del laboratorio de materiales de la UCAM.

Figura 7.21. Imágenes de las probetas 1, 2, 3 y 4 tras su plantación el 7 de junio de 2017.

Figura 7.22. Gráfica de Temperaturas medias máximas y mínimas.

Figura 7.23. Gráfica de precipitación diaria.

Figura 7.24. Imágenes de las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 6 de julio 2017.

Figura 7.25. Imágenes de las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 31 de julio 2017.

Figura 7.26. Imágenes de las probetas 2 y 4, de 7,5 cm. de espesor, el 31 de julio 2017.

Figura 7.27. Imágenes de las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 13 de septiembre 2017.

Figura 7.28. Imágenes de las dos probetas de 7,5 cm. de espesor el 13 de septiembre 2017.

Figura 7.29. Imágenes de las raíces desarrolladas durante el primer período de experimentos por algunos ejemplares a fecha de su eliminación el 24 de octubre de 2017.

Figura 7.30. Fotos de los módulos experimentales el día de su plantación (25 octubre 2017).

Figura 7.31. Gráfica de Temperaturas medias máximas y mínimas.

Figura 7.32. Gráfica de precipitación diaria.

Figura 7.33. Tabla comparativa de valores de Temperatura y Precipitación históricos y del período de estudio.

Figura 7.34. Fotos de las probetas tras un mes de su plantación el 20 noviembre 2017

Figura 7.35. Fotos de las probetas 1 y 3 durante la primavera (10 abril 2018).

Figura 7.36. Floración del *Limonium caesium* el 31 de julio de 2018.

Fig. 7.37. Fotos de los cuatro módulos experimentales hacia el final del experimento (31 julio 2018).

Figura 7.38. Gráfica de Temperaturas medias máximas y mínimas.

Figura 7.39. Gráfica de precipitación diaria.

Figura 7.40. Imágenes de las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 28 diciembre 2018

Figura 7.41. Mismo módulo experimental el 1 de junio y 28 de diciembre de 2018.

Figura 7.42. Resultados en 7,5 cm. Probeta 2 a 13 septiembre 2017 (izquierda). Probeta 4 a 13 septiembre 2017 (centro). Probeta 2 a 28 de abril 2018 (derecha).

Figura 7.43. Resultados en 15 cm. Probeta 3 a 13 septiembre 2017 (izquierda). Probeta 1 a 31 julio 2018 (centro). Probeta 3 a 28 diciembre 2018 (derecha).

Figura 7.44. Resultados en 15 cm. Probeta 3 a 13 septiembre 2017 (izquierda). Probeta 1 a 31 julio 2018 (centro). Probeta 3 a 28 diciembre 2018 (derecha).

Limonium Caesium. Ejemplares aún vivos el 13 de septiembre de 2017 en un módulo de 7,5 cm. de espesor (izquierda). Ejemplares con gran desarrollo y sus características pequeñas flores violeta pálido en 15 cm. de espesor el 1 de junio de 2018 (derecha).

Figura 7.45. *Thymus zygis*. Crecimiento del 19 de junio (izq.) a 2 agosto (centro y der.)

Figura 7.46. *Thymus zygis*. 25 octubre, 20 noviembre, 9 enero y 10 abril en módulo 4.

Figura 7.47. *Salvia lavandulifolia*. 25 octubre, 20 noviembre y 9 enero en módulo 4.

Figura 7.48. *Helichrysum stoechas*. Ejemplares totalmente secos en módulo 1 con riego (izq.) y brotes nuevos en el módulo 3 sin riego (derecha).

Figura 7.49. *Ephedra fragilis*. Crecimiento vertical en módulo de 15 cm. con riego.

Figura 7.50. *Rosmarinus eriocalix*. Ejemplar recién trasplantado y estado de los distintos ejemplares a fecha 13 de septiembre 2017.

Figura 7.51. Los ejemplares de *Asteriscus maritimus* dominan en gran medida las probetas de 7,5 y 15 cm. de espesor durante el mes de abril de 2018.

Figura 7.52. Mismo ejemplar de *Asteriscus maritimus* el 9 de enero, 10 de abril y 28 de diciembre de 2018.

Figura 7.53. *Brachypodium retusum*. Crecimiento y regeneración a 25 octubre de 2017, 9 enero, 10 abril y 28 de diciembre de 2018.

Figura 7.54. Salidas de evacuación del agua sobrante de los módulos a escala de cubierta vegetal.

Figura 8.01. Demandas de calefacción, refrigeración y climatización para las diferentes soluciones adoptadas.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.01. Tipos de clima y sus criterios de clasificación según Köppen-Geiger (1936).

Tabla 4.02. Resumen de datos climáticos de 22 ciudades de referencia y sus distintas clasificaciones.

Tabla 4.03. Valores climatológicos normales de la ciudad de Murcia.

Tabla 5.01. Requerimientos energéticos por cada m³ de agua potable en función de la procedencia.

Tabla 5.02. Requerimientos energéticos por cada m³ de agua potable en función de su transporte.

Tabla 5.03. Requerimiento energético de potabilización por m³ de agua en función de su salinidad.

Tabla 5.04. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en California.

Tabla 5.05. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en California.

Tabla 5.06. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en España.

Tabla 5.07. Intensidad energética Media en las distintas fases del ciclo Urbano del agua en España.

Tabla 5.08. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en el municipio de Valencia.

Tabla 5.09. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en el municipio de Almería.

Tabla 5.10. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en municipios de la Costa Brava.

Tabla 5.11. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en el municipio de Madrid.

Tabla 5.12. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en la Región de Murcia.

Tabla 6.01. Espesor de sustrato necesario/recomendado para diferentes tipos de vegetación.

Tabla 6.02. Propiedades físicas de diversos sustratos empleados en la literatura científica.

Tabla 7.01. Relación hueco/macizo por cada orientación del edificio tipo.

Tabla 7.02. Datos de la versión del software de cálculo empleado.

Tabla 7.03. Características de vegetación y sustrato seleccionadas para modelizar en DesignBuilder el material equivalente, llamado EcoRoof.

Tabla 7.04. Mejoras energéticas que aporta la cubierta vegetal EcoRoof al edificio modelo.

Tabla 7.05. Alteración de la transmisión de energía por cubierta bajo ambos escenarios, A y B.

Tabla 7.06. Resumen de mejoras térmicas durante el 15 de julio.

Tabla 7.07. Potencial de ahorro de energía de una cubierta verde en edificios con distintos niveles de aislamiento en Atenas, según Nichaou et al. (2001).

Tabla 7.08. Mejoras energéticas que aporta la cubierta vegetal EcoRoof al edificio modelo aislado.

Tabla 7.09. Alteración de la transmisión de energía por cubierta bajo ambos escenarios, C y D.

Tabla 7.10. Resumen de ahorros energéticos por tipo de edificio.

Tabla 7.11. Experimento realizado en verano de 2009 en Tel Aviv por Schweitzer y Erell. Tabla 7.12. Tabla comparativa de valores de Temperatura y Precipitación históricos y del período de estudio.

Tabla 7.13. Tabla comparativa de valores de Temperatura y Precipitación históricos y del período de estudio.

Tabla 7.14. Escenarios de riego en función de la climatología anual teniendo en cuenta dos intensidades hídricas distintas, entre 1.00 y 1.20 L/m² al día

Tabla 7.15. Reducción de la demanda de climatización en edificios poco aislados y construcciones Passivhaus al sustituir sus cubiertas planas convencionales (A y C) por una azotea verde (B y D).

Tabla 7.16. Cuatro posibles escenarios de necesidad de aporte de riego anual para los años 2017 y 2018, bajo dos hipótesis de necesidades hídricas totales, entre 1,00 y 1,20 l/m² al día de media, incluyendo el riego y las precipitaciones.

Tabla 7.17. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en la Región de Murcia.

Tabla 7.18. Consumo energético equivalente del agua empleada para riego en los cuatro escenarios hídricos propuestos.

Tabla 7.19. Clasificación de las cubiertas ecológicas en zonas cálidas y semi-áridas en función de su Eficiencia Hidro-Energética.

Tabla 7.20. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio poco aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados.

Tabla 7.21. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio muy aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados.

Tabla 8.01. Escenarios de riego en función de la climatología anual teniendo en cuenta dos intensidades hídricas distintas, entre 1.00 y 1.20 L/m² al día.

Tabla 8.02. Consumo energético equivalente del agua empleada para riego en los cuatro escenarios hídricos propuestos.

Tabla 8.03. Resumen de ahorros energéticos por tipo de edificio.

Tabla 8.04. Reducción de la demanda de climatización en edificios poco aislados y construcciones Passivhaus al sustituir sus cubiertas planas convencionales (A y C) por una azotea verde (B y D).

Tabla 8.05. Clasificación de las cubiertas ecológicas en zonas cálidas y semi-áridas en función de su Eficiencia Hidro-Energética.

Tabla 8.06. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio poco aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados.

Tabla 8.07. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio muy aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados.

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Visitas de campo.

ANEXO 2: Propiedades de las especies vegetales seleccionadas.

ANEXO 3: Sistemas Comerciales estudiados.

ANEXO 4: Proceso de instalación de los módulos experimentales.

ANEXO 5: Resultados de los cálculos energéticos en DesignBuilder.

I - INTRODUCCIÓN

I - INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Las cubiertas o azoteas verdes son percibidas generalmente como un elemento sostenible y deseable en la arquitectura, aportando un buen número de ventajas ecológicas y económicas a los edificios y a su entorno (Osmundson, T. 1999)¹ (Sutton, R., 2015) (Getter, K. Rowe, B. 2006) (Minke, G. 2005).

Aunque los beneficios cualitativos de estas soluciones constructivas son bien conocidos, la falta de un análisis integral desde el punto de vista cuantitativo, supone todavía un reto para su clasificación y calificación.

Por un lado, como se desarrollará más adelante, numerosos estudios avalan la capacidad de este tipo de cubiertas de disminuir el gasto energético de los edificios tanto en régimen de verano como de invierno y su efecto de atemperación del ambiente exterior del edificio. A su vez, otras publicaciones exploran separadamente el consumo de agua, crecimiento y supervivencia de múltiples especies vegetales para diversas tipologías constructivas.

Sin embargo, los estudios que relacionan el ahorro energético de una determinada solución constructiva con su consumo de agua o viabilidad en climas más áridos son muy escasos o parciales.

Además, esta tipología constructiva y su investigación se han desarrollado más profusamente en regiones frías, donde la climatología y, sobre todo, la disponibilidad de agua favorecen el crecimiento de la vegetación. En regiones cálidas y secas como la Mediterránea, donde la disponibilidad de agua es muy limitada y su uso conlleva un alto consumo energético, la selección de soluciones adaptadas a este entorno se hace especialmente importante.

Por tanto, el objetivo de esta tesis es determinar, aquellas soluciones constructivas y selección de especies mejor adaptadas a los climas semi-áridos del Mediterráneo.

¹ Osmundson añade, además de estas dos citadas, una componente social a las ventajas de las cubiertas verdes. Ver pág. 28 de Osmundson, T. (1999). *Roof gardens : history, design, and construction* (1st ed). New York: Ed. W.W. Norton & Company.

Para ello, se analizarán los beneficios cuantitativos en términos de reducción del consumo de energía junto con las necesidades hídricas de varias soluciones adaptadas al entorno.

Las conclusiones de este estudio llevarían a establecer un nuevo método de clasificación de las cubiertas vegetales para el clima Mediterráneo semi-árido, en función de su eficiencia hidro-energética global.

1.2. LA CUBIERTA ECOLÓGICA

Durante las últimas décadas el interés por la ecología y la eficiencia energética en la Arquitectura ha experimentado un espectacular aumento, especialmente en las sociedades desarrolladas. Los problemas derivados de las sucesivas crisis del petróleo, el efecto invernadero y las emisiones de CO² producidos por la gran escalada en el consumo de energía en estas sociedades han generado una corriente de concienciación medioambiental.

Como consecuencia de este proceso, los arquitectos han empezado a emplear cada vez más soluciones consideradas como sostenibles, tanto aquellas basadas en nuevos sistemas técnicos, como otras adoptadas desde una perspectiva bioclimática. En este sentido, tal y como recomienda el profesor Neila:

“Los principios bioclimáticos deben aparecer como un hábito en la construcción y no como una rareza o una excepción. Por eso se debe hablar de buenas prácticas y de buena arquitectura y no de arquitectura singular. Estas buenas prácticas deben tener como objetivo la calidad del ambiente interior y la reducción de los efectos negativos sobre el entorno.”²

La cubierta verde, que constituye una de las soluciones más características de esta corriente de arquitectura bioclimática y está inscrita dentro del fenómeno más amplio de naturación urbana (Granados, H. 2006) (Urbano-López, B. 2013)³, ha sido posible precisamente gracias a una mezcla de estos dos factores mencionados. Por un lado, la mejora de los materiales y tecnologías de

² En Neila, F. J. (2000). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Buenas prácticas edificatorias*. Cuadernos de Investigación urbanística, 41, pp. 89-99.

³ La autora describe la naturación urbana como “la acción de incorporar la vegetación al medio urbano con el objetivo de amortiguar el desequilibrio entre la urbanización y la conservación del medio ambiente”.

impermeabilización de cubiertas y por otro, las cualidades ambientales y estéticas que aporta esta solución bioclimática (Getter & Rowe, 2006).

También llamadas cubiertas ecológicas⁴, estas intervenciones constituyen pequeñas alteraciones humanas en el ecosistema y están construidas en las azoteas de los edificios, nuevos y existentes, a base de resistentes membranas de impermeabilización, capas técnicas de drenaje/acumulación de agua y sustratos de crecimiento donde se desarrollan ejemplares vegetales de las más diversas especies que tratan de devolver la huella ocupada por los edificios a un teórico estado natural (Sutton, R. 2015) (Lee, A. Sailor, D. Larson, T. Ogle, R. 2007).



Figura 1.01. ¿Pueden las cubiertas ecológicas devolver a la naturaleza la huella ocupada por los edificios? Fotografía del autor cerca del Cuartel del Ciscar en Águilas, Murcia.

Históricamente, las cubiertas de las edificaciones habían desempeñado funciones muy diversas, incluso estéticas, pero principalmente de resguardo

⁴ Cabría diferenciar el concepto genérico de “cubierta ecológica” del aplicado por Neila, F. Bedoya, C. Acha, C. Olivieri, F. Barbero, M. (2008) en *Las cubiertas ecológicas de tercera generación: un nuevo material constructivo*, en referencia a una tipología específica de cubierta vegetal con aljibe incorporado.

frente la lluvia. Su evolución siguió dos caminos bien diferenciados. Por un lado, empujada por la normativa, una vía técnica exclusivamente de protección, añadiendo mejor impermeabilización y aislamiento. Por otro, existen desde antiguo, tal y como se ha visto reflejado en la arquitectura bioclimática tradicional, muchas experiencias alternativas que incentivan de forma controlada ciertos fenómenos físicos de tipo radiativo, convectivo, inercial, etc. Entre ellas se podrían enmarcar las cubiertas verdes utilizadas como elemento de mitigación climática (Tellez, F.M. Granados, H. Zarzalejo, L.F. Schwartz, G. Marco, J. 1996).

Sin embargo, como señala Palomo Del Barrio, E. (1998), debido a la introducción y utilización generalizada durante el siglo XX de sistemas de climatización artificial para los edificios, muchas de estas técnicas de aislamiento y refrescamiento natural que llevaban siendo empleadas durante siglos habían decaído a una aplicación bastante escasa en las últimas décadas.

La moderna cubierta vegetal, en concreto la extensiva, nació como movimiento en Centroeuropa en la década de 1970 (Thuring, C. Dunnett, N. 2014) y se extendió de forma generalizada al resto del mundo para el comienzo del nuevo milenio. En la actualidad son miles las cubiertas verdes que cubren edificios de las más diversas características en metrópolis de todo el globo (Sutton, R. 2015).

Desde un punto de vista cualitativo se reconoce en estas cubiertas una serie de beneficios como la mejora del confort interior y exterior de los edificios, la reducción de los picos de electricidad durante el verano, la capacidad de amortiguar y reducir la descarga de agua pluvial a las redes, la filtración de la polución ambiental, la restauración del paisaje causada por la urbanización, la provisión de espacio para la recreación y la agricultura urbana, el aumento de la biodiversidad o la reducción del ruido y del efecto isla de calor de las ciudades (Fioretti, R. Palla, A. Lanza, L. G. Principi, P. 2010), (Getter, K. Rowe, B. 2006), (Lee et al., 2007) (Minke, G. 2005).

Respecto a la eficiencia energética, su funcionamiento teórico, al igual que el de otros sistemas bioclimáticos, se basa fundamentalmente en tres factores: el sombreado causado por la vegetación; el aumento de aislamiento e inercia térmica que aporta el sustrato y en las propiedades físicas del agua (Serra, R. 1999) (Yannas, S. Erell, E. Molina, J. 2006) (Kruger, E. González Cruz, E. Givoni, B. 2010) (Granados, H. 2006). Todas estas técnicas pasivas de

aislamiento/enfriamiento, presuponen unas condiciones de contorno ideales para conseguir un estado óptimo de la vegetación así como de la humedad del sustrato, que depende de la climatología y en muchos casos de los aportes artificiales de agua.

Sin embargo, la arquitectura como disciplina no ha desarrollado aún un gran interés con respecto a las problemáticas relacionadas con el agua. Por consiguiente, para aquellas regiones con menor disponibilidad o periodicidad de agua de lluvia, estas cubiertas no sólo representan un reto técnico, sino que se hace necesario conocer si estas soluciones, consideradas a priori como ecológicas o sostenibles, suponen un aumento del consumo de agua o si en su caso, los beneficios cuantificables que aportan superan con creces a sus inconvenientes (Schweitzer & Erell, 2014).

1.3 BENEFICIOS CUALITATIVOS DE LAS CUBIERTAS VERDES.

Existe, a nivel científico, un amplio consenso respecto a las virtudes que las cubiertas vegetales aportan a los edificios, si bien en algunos casos estas contribuciones son difícilmente cuantificables. A continuación, se recoge una amplia revisión bibliográfica de los principales beneficios que se atribuyen habitualmente a estas soluciones constructivas, para en capítulos posteriores desarrollar en profundidad aquellos aspectos cuantitativos más relevantes para esta investigación.

1.3.1 Mejoras ecológicas

Uno de los beneficios que aportan las cubiertas vegetales más reconocidos por la literatura científica consultada, es la re-creación de hábitats naturales, inicialmente perdidos, para la flora y fauna local en el contexto de las ciudades y los edificios (Dunnett, N. 2006) (Minke, G. 2005), algo que es particularmente importante en ciudades muy densas donde los espacios verdes están muy restringidos y los hábitats naturales a nivel del suelo prácticamente desaparecen (Dunnett, N. Kingsbury, N. 2004).

Por su parte, autores como Getter y Rowe (2006) afirman que puesto que la mayor parte de las cubiertas verdes que se realizan son extensivas y no tienen por

tanto presencia habitual de personas, estos espacios constituyen un hábitat tranquilo para muchas especies de microorganismos, insectos y aves, aumentando la biodiversidad de las ciudades.

Los tres factores que más contribuyen a la biodiversidad de las cubiertas verdes y las ciudades donde se ubican son el tipo de sustrato de crecimiento, el proceso de formación del suelo y su contenido de materia orgánica y por último la evolución de la actividad biológica como consecuencia de un aumento de materia orgánica proveniente de hojas secas u organismos (Li, W. Yeung, K. 2014).

Como demostración de este beneficio desde el prisma científico, numerosos estudios llevados a cabo en todo el mundo, recogen un claro aumento de la diversidad de especies en este tipo de cubiertas (Van Mechelen et al., 2014) (Klein, P. Coffman, R. 2015) (Dvorak, B. Volder, A. 2012). Más aún, según algunos de estos autores, se espera que las cubiertas vegetales contribuyan a restaurar la distribución de especies de plantas nativas en un área determinada y favorezcan la fauna local mejor adaptada a esta flora autóctona.

Por otro lado, conforme ha ido aumentando el interés por las cubiertas vegetales y la biodiversidad, según afirma Dunnett, N. (2006), ha aparecido una corriente de trabajo encaminada a maximizar la conservación de la naturaleza, a través de lo que se han denominado como “cubiertas biodiversas” o “cubiertas verdes para la biodiversidad”. Este movimiento ha surgido como consecuencia de una idea ecológica arraigada en muchos de estos autores y se caracteriza por la utilización de unos principios provenientes de la teoría ecológica tales como el uso exclusivo de especies nativas y de asociaciones vegetales locales, la utilización de esquejes de viveros locales y el empleo de sustratos locales.

No obstante, sostiene el autor, que según sus investigaciones estos parámetros, aunque perfectamente válidos para mejorar la biodiversidad de las azoteas verdes no son necesariamente los más eficaces o al menos no invalidan la idoneidad de otras soluciones de cubierta que utilizan plantas exóticas o sustratos no locales para conseguir el mismo fin.

Adicionalmente podría darse la paradoja de que las especies vegetales locales, en teoría mejor adaptadas a las condiciones climáticas de una zona, no sean capaces de soportar el alto nivel de estrés al que se ve sometida la vegetación

en una cubierta verde (Getter & Rowe, 2006), por lo que su prescripción como idea preconcebida debe ser completamente descartada.

1.3.2 Filtración de la polución ambiental

Otro de los aspectos positivos de la naturación urbana a través de las cubiertas está relacionado con la disminución de la polución del aire en las ciudades, que es una de las principales causas de numerosos problemas respiratorios y de salud de las personas (Getter & Rowe, 2006). Esta purificación se produce a través de la fijación parcial en el sustrato de crecimiento, las hojas y tejidos de las plantas (Olgyay, V. 1998)⁵ (Minke, G. 2005) de las partículas contaminantes presentes en el aire, entre las que se encuentran aquellas emitidas por los motores diesel, NO₂, SO₂, etc. Además, la amortiguación térmica que genera la vegetación, reduce los gradientes de temperatura y elimina las corrientes de aire ascendente que se producen en superficies muy calientes que arrastran polvo y partículas de nuevo al aire ambiente (Minke, G. 2005).

Por otro lado, la vegetación, a través de la fotosíntesis fija el dióxido de carbono presente en el aire y produce oxígeno, recargando la atmósfera y mejorando la calidad del aire en las ciudades (Fioretti et al., 2010) (Minke, G. 2005) (Osmundson, T. 1999).

También las cubiertas verdes reducen los efectos de la lluvia ácida, elevando el PH del agua, originalmente entre 5 y 6 en forma de lluvia, hasta 7 u 8 puntos una vez pasa a ser agua de escorrentía (Li & Yeung, 2014).

Adicionalmente, según algunos autores las cubiertas vegetales filtran las partículas de polución que de otra forma recoge y transporta el agua de lluvia, mejorando la calidad del agua que resulta de su drenaje, permitiendo así su mejor reutilización (Beecham, S. Razzaghmanesh, M. 2015).

Estos investigadores realizaron 50 mediciones de calidad del agua en 16 cubiertas experimentales con diferentes configuraciones estudiando los niveles de PH, turbidez, nitratos, nitritos y amoníaco entre otros y concluyeron que aunque el agua reciclada era sólo apta para usos no potables, la calidad del agua sobrante

⁵ Aunque en su libro, *Arquitectura y Clima*, el autor se refiere a la vegetación compuesta por árboles y arbustos en general, no particularmente a su instalación en las cubiertas, entendemos que su afirmación mantiene toda su validez en las azoteas de los edificios.

de las cubiertas ajardinadas era superior a la de superficies impermeables. En concreto, dentro de la categoría de cubiertas verdes, aquellas con vegetación establecida también presentaban una mejor calidad del agua frente a las que contenían sólo sustrato sin cubrición vegetal.

Profundizando aún más en el problema de la contaminación, algunos autores como Bianchini y Hewage (2012), han estudiado el balance global de polución ambiental de una azotea vegetal al cabo de su vida útil y afirman que las ventajas superan a los inconvenientes. En su investigación, comprobaron que la polución producida en el proceso de fabricación de los materiales típicos de una cubierta verde, se vería ampliamente contrarrestada por la filtrada por las plantas en el espacio de su vida útil. No obstante, sus recomendaciones pasan por investigar materiales alternativos, más sostenibles y menos contaminantes que los utilizados generalmente en cubiertas, muchos de ellos basados en polímeros plásticos, y abogan por la introducción de materiales reciclados provenientes de los procesos de construcción y demolición.

1.3.3 Atenuación de descarga de aguas pluviales a las redes.

Las cubiertas de los edificios representan aproximadamente la mitad de la superficie no porosa de las ciudades (Farreny, R. Morales-Pinzon, T. Guisasola, A. Taya, C. Rieradevall, J. Gabarrell, X., 2011) y por tanto contribuyen en gran medida a los caudales de agua de escorrentía que se descargan a las redes municipales en episodios de lluvias. Según Scholz-Barth (2001), en este contexto urbano tan sólo el 5% de la precipitación se filtra hasta los acuíferos, un 15% se evapora gracias a la vegetación, mientras que un 75% se convierte en escorrentía.

Estas condiciones, junto con la variabilidad del clima, generan presiones adicionales en las redes de descarga y en el ciclo hidrológico y pueden contribuir activamente a episodios de inundaciones en las ciudades (Razzaghmanesh, M. Beecham, S. 2014). Como consecuencia, la introducción de infraestructura de drenaje sostenible, también conocida como SUDS, a la que pertenecen las cubiertas verdes, puede ayudar a paliar estos problemas derivados de la excesiva urbanización (Beecham & Razzaghmanesh, 2015).

Sin embargo, puesto que las cubiertas verdes han sido principalmente desarrolladas en países fríos o templados, con condiciones climáticas más

favorables al crecimiento de la vegetación y lluvias más estables a lo largo del año, la mayoría de los estudios hidrológicos realizados hasta la fecha se centran únicamente en su comportamiento hídrico anual (Fioretti et al., 2010).

Este dato general es muy interesante para conocer la reducción de aguas pluviales que se vierten a la red anualmente y por tanto la disminución del trabajo a realizar por las plantas de depuración municipales, con los consiguientes ahorros tanto económicos y energéticos como en el dimensionamiento más ajustado de las infraestructuras hídricas (Getter, K. Rowe, B. Andressen, J. 2007).

Por contra, en el caso de zonas más áridas, donde los episodios de precipitación son mucho más intensos y concentrados, como es el Mediterráneo, los datos estacionales y por episodio adquieren mucha más relevancia (Fioretti et al., 2010).

Tanto desde el punto de vista anual como de episodios puntuales, los beneficios hidrológicos de las cubiertas verdes se deben a tres elementos fundamentales: La capacidad de retención de agua de lluvia, el efecto de retraso en la evacuación del agua no retenida y la evapotranspiración de la cubierta a través de las plantas (Fioretti et al., 2010).

En primer lugar, ante un episodio de precipitación, las cubiertas verdes son capaces de almacenar parte del volumen de lluvia en el interior de los materiales que las componen: sustrato, láminas de retención y capas de drenaje y acumulación. Este fenómeno depende fundamentalmente de: el número de capas de la cubierta, su composición y su espesor, además obviamente de la cantidad de precipitación recibida y de las condiciones ambientales de temperatura y humedad.

Por un lado, según un estudio de Fioretti et al. (2010), las evidencias de sus experimentos confirman que las cubiertas verdes mitigan significativamente el volumen de agua pluvial que se descarga a las redes y que esta reducción depende sobre todo de las características del sustrato. En cambio, es particularmente llamativo que, según los autores, los factores de profundidad del sustrato e inclinación de la cubierta tenían una influencia significativamente menor. De hecho, según sus investigaciones, aumentar el espesor del sustrato desde 2 cm. hasta 15 cm. no incrementaba sustancialmente la capacidad de retención, únicamente desde un 60 hasta un 80% del volumen.

En la misma línea, Razzaghmanesh y Beecham (2014), realizaron un estudio en la árida ciudad Australiana de Adelaida donde la precipitación está muy concentrada en invierno y es muy escasa en verano. En él comprobaron que el espesor de sus distintos prototipos, 100 y 300mm de sustrato, no generaba diferencias muy significativas en la capacidad de retención de agua, desde el 74% al 88%. Sin embargo sí que afirman que las cubiertas que calificaron como intensivas, aquellas con 300mm de espesor, al permitir acumular algo más de agua de lluvia, podrían reducir la necesidad de riego suplementario, aunque no lo validaron con experimentos.

Según la mayoría de autores, la inclinación de la cubierta tampoco es excesivamente relevante en cuanto a la retención de agua⁶ (VanWoert, N. Rowe, B. Andresen, J. Rugh, C. Fernandez, T. Xiao, L., 2005a). Para intensidades de lluvia moderada, una cubierta construida al 2% de pendiente con 4 cm. de espesor retendrá más agua (98% de la precipitación) que la misma cubierta construida al 6,5% de pendiente (90% de la precipitación). Pero por el contrario, para intensidades puntuales más elevadas, ambas cubiertas retendrían la misma cantidad, aproximadamente un 80%.

De la misma forma (Beecham & Razzaghmanesh, 2015) constatan que para cubiertas equivalentes pero con inclinaciones de 1° y 25° se obtienen resultados de retención de agua muy similares.

Por su parte Getter et al. (2007), llegan también a conclusiones similares, con valores medios de retención en torno al 80% y diferencias de sólo el 10% entre aquellas probetas construidas al 25% de pendiente, con retención del 75% del agua de lluvia, y las que se realizaron con el 2% de inclinación, que consiguieron retener hasta el 85% de la precipitación, lo que podría equivaler a entre 28,2 y 48,4mm de agua, para el clima templado en el que realizaron su estudio.

Como conclusión, Fioretti et al., (2010) atribuyen esta disparidad de resultados entre varios de los estudios mencionados a los diferentes patrones de precipitación presentes en distintas localizaciones.

La segunda de sus cualidades hídricas de una cubierta vegetal consiste en retrasar la descarga a las redes del agua de lluvia que no ha sido capaz de retener.

⁶ La inclinación sí es, en cambio, muy relevante para determinar la forma de construcción y la elección de vegetación, según señala Minke, G. (2005) en *Techos Verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Artieda (Navarra). Ed. EcoHabitar. (pag. 25).

Con esto se consigue que el agua sobrante de la cubierta no llegue a las redes municipales al mismo tiempo en que ocurre la precipitación y por tanto los picos de descarga de aguas pluviales se reduzcan, consiguiendo mejorar la seguridad de las redes y posibilitando un dimensionamiento más ajustado. Uno de los factores preponderantes en este caso, además del tipo de sustrato, es el contenido de humedad inicial del sustrato al comienzo del episodio de lluvia (Fioretti et al., 2010).

En tercer lugar, el fenómeno de la evapotranspiración juega también un papel importante en las cualidades hidrológicas de las cubiertas (Wadzuk, B.M. Schneider, D. Feller, M. Traver, R.G. 2013), puesto que permite evacuar parte del agua sobrante de episodios intensos de lluvia a través de las plantas, evitando así también que vayan a parar a las redes de drenaje, aunque quizá sea el fenómeno menos estudiado de los tres (Voyde, E. Fassman, E. Simcock, R. Wells, J. 2010).

En este caso los factores más influyentes son la existencia o no de adecuada cobertura vegetal y por supuesto el tipo de especies elegidas. Autores como Beecham y Razzaghmanesh (2015) en un estudio realizado con 16 prototipos con diversas configuraciones de cubiertas, concluyeron que aquellas cubiertas con vegetación retenían más agua de lluvia, entre 52% y 95%, que sus equivalentes sin vegetación, que sólo conseguían valores entre 31% y 65%. Más aún, sus experimentos permitían afirmar que para episodios de precipitación cercanos en el tiempo el factor que determina la retención es el tipo de sustrato y en cambio para episodios más distanciados en el tiempo, como ocurre en climas áridos, adquiere mayor importancia la presencia de vegetación.

También Nardini, A. Andri, S. Crasso, M. (2012) obtienen resultados similares en un estudio en la ciudad italiana de Trieste, donde los módulos experimentales que contaban con vegetación redujeron significativamente la cantidad de descarga de agua a las redes, en un 90%, en comparación con los testigos que no contenían plantas, que sólo retuvieron un 63%. Es interesante remarcar que en su caso el espesor de sustrato sólo produjo alteración de los porcentajes en los módulos sin vegetación y que los módulos con plantas retuvieron la misma cantidad de agua, independientemente de que su espesor fuera 12 o 20 cm.

Por tanto, cabe concluir que estudiar y mejorar las características de las cubiertas en general y de las cubiertas vegetales en particular puede aportar a la

ciudad importantes beneficios desde el punto de vista hidrológico y económico (Compton, J. Whitlow, T. 2006) (VanWoert, N. et al., 2005a).

Es precisamente por ello que autores como Compton y Whitlow (2006), critican que el diseño de cubriciones ecológicas se circunscriba en muchas ocasiones a soluciones muy enfocadas a minimizar el mantenimiento, como ocurre con las cubiertas de *Sedum*, y no siempre trate de maximizar estos beneficios potenciales como la captación de agua de lluvia o la capacidad de evapotranspiración que otras familias de plantas pueden aportar.

No obstante, sus ideas son desafiadas por los experimentos llevados a cabo por Voyde et al. (2010) en Nueva Zelanda, donde demuestran que las plantas crasuláceas, a las que pertenece el *Sedum mexicanum* utilizado en su estudio, no siempre son conservadoras en su uso del agua y que fuera de los períodos de sequía también pueden contribuir a restaurar la capacidad de atenuación de aguas pluviales de las cubiertas⁷.

1.3.4 Reducción de temperatura en las ciudades. Adaptación al cambio climático

Actualmente, el 55% de la población mundial vive en áreas urbanas y se espera que esta proporción crezca hasta el 68% en el año 2050, añadiendo así otros 2.500 millones de personas a las urbes actuales del planeta (United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2019). Y es precisamente en las ciudades, donde la falta de vegetación causa un incremento significativo de la temperatura (Vidal, P. Olivieri, F. Olivieri, L. Neila, J. 2010) y donde el impacto del calentamiento global y del desarrollo urbano generan mayores peligros medioambientales, entre ellos el efecto de Isla de Calor (UHI o Urban Heat Island).

Este fenómeno se define como la subida de la temperatura del aire en zonas densamente construidas respecto al campo que las rodea. La principal causa es la modificación de la superficie del terreno en las zonas urbanizadas, donde la vegetación se reemplaza por superficies artificiales, pavimentos, carreteras y

⁷ Bien es cierto, que en condiciones de estrés hídrico, la capacidad de retención de agua de la cubierta de *Sedum mexicanum* utilizado en el experimento, era un 50% inferior a la otra especie empleada, *Disphyma australe*, lo que reduce la efectividad de este *Sedum* precisamente en épocas de fuertes tormentas.

edificios, caracterizadas por una alta absorción solar, alta impermeabilidad y alta inercia (Zinzi, M. Agnoli, S. 2012), (Klein, P. Coffman, R. 2015).



Figura 1.02. Fotografía aérea de la ciudad de Murcia (2018). Las superficies construidas y los colores oscuros predominan en su paisaje aéreo, redundando en un mayor calentamiento durante los meses más cálidos. Fuente: Google Maps (2018).

El fenómeno de Isla de Calor se monitorizó por primera vez en Londres, durante el siglo XIX (Howard, L. 1883) y sus cambios no solo alteran negativamente la temperatura exterior⁸ sino también las cargas térmicas durante los meses cálidos lo que afecta al rendimiento de los sistemas de refrigeración (Alexandri, E. Jones, P. 2008).

Según el Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) una de las soluciones más eficaces para combatir este efecto de isla de calor en las ciudades es modificar el clima mediante medidas adaptativas. Esto significa modificar los sistemas tanto naturales como humanos para responder a este cambio climático y paliar sus efectos.

Las técnicas consideradas más efectivas son el uso de materiales de gran reflectividad (Sfakianaki, A. Pagalou, E. Pavlou, K. Santamouris, M. Assimakopoulos, M. 2009) y aumentar la proporción y la densidad de masa vegetal en las zonas urbanas, como puede ser mediante el uso de cubiertas vegetales (Razzaghmanesh, M. Beecham, S. Brien, C. J. 2014).

Según Alexandri y Jones (2008), los beneficios de las cubiertas vegetales no sólo se limitan a los edificios, sino que también se pueden extender a la escala

⁸ Las diferencias de temperatura entre la ciudad y su entorno rural puede alcanzar hasta los 12 °C según Zinzi y Agnoli (2012).

urbana. Según los autores, Las superficies vegetales de las cubiertas tienen un impacto positivo en las condiciones higrotérmicas de los exteriores del edificio y de las zonas urbanas adyacentes. Uno de los beneficios más importantes es el de mitigar el efecto de Isla de Calor.

Cubriendo las azoteas y los muros de los edificios con vegetación, el confort térmico del entorno se puede mejorar notablemente, no solo en climas muy cálidos, sino también en otros más fríos, donde la población está aclimatada a temperaturas más bajas (Alexandri, E. Jones, P. 2008). Afirma el mencionado estudio que, en ciudades como Riyadh, se pueden llegar a conseguir disminuciones de temperatura en el entorno de las cubiertas de 26 °C (pico) con medias diarias 12,8 °C más bajas, mientras que a nivel de calle las reducciones de temperatura podrían alcanzar los 11,8 °C y 9.1 °C respectivamente. Aun así, ciudades más húmedas y menos cálidas como Londres también se podrían beneficiar de una reducción de 15.5 °C (pico) a nivel de cubierta durante el verano. Su investigación demuestra que cuanto más cálido y seco es el clima, mayores son los efectos de la vegetación urbana en disminuir las temperaturas de la ciudad, algo de especial relevancia en las zonas Mediterráneas.

Sin embargo, en un estudio realizado en la ciudad australiana de Melbourne por Coutts, A. Daly, E. Beringer, J. Tapper, N. (2013), se comprueba que una cubierta vegetal de *Sedum* sin riego adicional durante el verano no es la solución óptima para lograr objetivos de enfriamiento pasivo. Es por ello que los autores concluyen que las azoteas verdes podrían ser tan beneficiosas como otras técnicas, siempre y cuando se encuentren completamente tapizadas por un manto de vegetación muy densa que, al contrario del *Sedum*, permita la evapotranspiración y provea de sombreado adicional al sustrato y las capas inferiores.

Por el contrario, entre las muchas soluciones constructivas de cubrición que estudian Gagliano, A. Detommaso, M. Nocera, F. Evola, G. (2014) en un experimento en Catania, Italia, en el que comparan las cubiertas frías, pintadas de blanco reflectivo, las azoteas ajardinadas y las tradicionales, demuestran que en la zona del Mediterráneo las que tienen mayor potencial en disminuir el efecto Isla de Calor de las ciudades y proteger los edificios son las cubiertas verdes construidas sobre una capa de aislamiento moderado.



Figura 1.03. Recreación de la ciudad de Beirut con sus techados convertidos en cubiertas verdes. Fuente: <https://expansión.mx>.

1.3.5 Mejora de la temperatura en edificios. Eficiencia energética.

Como ya se ha comentado previamente, está ampliamente demostrado que las cubiertas vegetales, entre otras técnicas pueden aportar beneficios muy significativos en el comportamiento térmico de los edificios, generando refrescamiento pasivo a su interior y a su entorno (Zinzi & Agnoli, 2012). Este enfriamiento se debe principalmente al efecto positivo que las plantas generan a través del sombreado y evapotranspiración y al incremento de inercia térmica que aportan el sustrato y el agua retenida.

Por tanto, esta influencia positiva depende en gran medida de la elección del tipo de vegetación, ya que la temperatura superficial que alcanzan las plantas es muy diferente según su color y su densidad de follaje (Karachaliou, P. Santamouris, M. Pangelou, H 2016). Además, las características de las especies vegetales afectan a las transferencias de calor por convección y radiación a través de la superficie de la cubierta (Zinzi & Agnoli, 2012) (Palomo Del Barrio, E. 1998) (Sailor, D.J. 2008).

Según numerosos estudios y simulaciones realizadas, las cargas térmicas debidas a la radiación solar y a la temperatura del aire se ven reducidas antes de entrar en el edificio por la capa de cubrición vegetal (Kumar, R. Kaushik, S.C. 2005) (Palomo Del Barrio, E. 1998). Este fenómeno depende de la absorción por parte de las plantas de parte de la radiación solar para llevar a cabo sus funciones vitales: fotosíntesis, evapo-transpiración y respiración. Además, el propio sustrato actúa como aislamiento adicional a la cubierta y el contenido de agua incrementa

la inercia térmica y el retraso térmico de la estructura (Ascione, F. Bianco, N. de' Rossi, F. Turni, G. Vanoli, G. P 2013). Por otro lado, las cubiertas son el elemento del edificio con el factor de visión de cielo (sky-view factor ó SVF) más alto, parámetro que afecta fuertemente en la elección de las mejores técnicas para combatir la demanda energética de verano.

Según Ascione et al. (2013), los efectos beneficiosos de las cubiertas vegetales son indiscutibles. Según estos autores, en verano se puede reducir la demanda de refrigeración entre el 1.1 y el 10.8% para localizaciones como Tenerife y entre el 0.9 y 11% para Sevilla en comparación con una solución convencional adaptada a las últimas exigencias en normas energéticas, con aproximadamente 12 cm. de aislamiento.

En un estudio en Ancona, Italia, Fioretti et al. (2010) demostraron que los beneficios de la sombra generada por la vegetación en las cubiertas son muy significativos en la reducción de la radiación recibida, así como la disminución de la temperatura superficial y la atenuación de las fluctuaciones de temperatura interior. Todos estos factores generaban un descenso de las ganancias de calor a través de la cubierta durante el verano con respecto a una cubierta tradicional.

Otras investigaciones realizadas en el área Mediterránea, en particular las publicadas por Santamouris, M. Pavloua, C. Doukasa, P. Mihalakakoub, G. Synnefaa, A. Hatzibiroso, A. Patargias, P. (2007) en una cubierta vegetal sobre una guardería en Atenas, demuestran que las cubiertas verdes pueden significar una reducción de la carga térmica de refrigeración en los periodos de verano de hasta un 87%, en función de las condiciones exteriores, ocupación y características del edificio objeto.

Adicionalmente, su hallazgo más relevante consiste en que el aumento de la demanda de calefacción era insignificante, algo que los investigadores consideran una ventaja, ya que cualquier intervención en la envolvente térmica encaminada a la reducción de la demanda de refrigeración suele producir un aumento de la demanda de calefacción en Invierno.

En este sentido, es importante remarcar que los beneficios que se obtengan en épocas cálidas no deben verse contrarrestados por pérdidas significativas de eficiencia energética durante el período más frío.

En esa línea, Ascione et al., (2013) en su estudio teórico en varias localizaciones de Europa, comprueban que una capa reflectiva de color frío,

blanco, en cubierta es la solución más efectiva para el verano, aunque en función de la severidad del invierno según las zonas de estudio, el balance global puede ser negativo. Por ejemplo, para el caso de Tenerife, donde no existe demanda de calefacción (en su edificio ejemplo), el tejado reflectivo (blanco) es lo más adecuado consiguiendo un 12% de ahorro energético anual frente al 11% de una cubierta vegetal de gramíneas. En Sevilla los resultados serían similares para el tejado reflectivo blanco y la cubierta vegetal de gramíneas con un 11% de ahorro energético anual en ambos casos. Sin embargo, en Roma, aunque la cubierta vegetal se comporta ligeramente peor en verano, obtiene mejores resultados en invierno, equilibrando la solución con un 8.4 frente a 7.8% de reducción al cabo del año.

Otro experimento, en este caso con módulos reales, llevado a cabo por Schweitzer y Erell (2014) con 4 especies vegetales arroja unos resultados similares que demuestran el efecto que las cubiertas vegetales podrían producir en un edificio. En verano, las temperaturas interiores máximas diurnas se suavizan entre 3.1 y and 4.4 grados, con respecto a una cubierta de muestra que incluye sustrato, pero no vegetación. Este efecto, como se ha comentado previamente es una combinación de varios mecanismos: afecta a las transmisiones de calor por radiación, al generar sombra, y por evapotranspiración de las plantas y del sustrato. Las conclusiones de su estudio son claras, el efecto de la sombra es sin duda el mayor contribuyente a la eficacia en el enfriamiento del interior del edificio.

Por el contrario, en invierno, el efecto aislante de las plantas es menos notable y aunque la vegetación reduce las ganancias solares directas sobre la cubierta, según los autores, en un edificio bien aislado la diferencia podría ser nula. Aun así, ambas cubiertas, sustrato con y sin vegetación, proveen de inercia térmica al edificio, lo que disminuye las variaciones de temperatura y suaviza las mínimas alrededor de 2-3 grados.

Otros autores como Karachaliou et al. (2016) en un experimento con un edificio de oficinas correctamente aislado en Atenas, llegan a conclusiones similares, demostrando que un ahorro de 19% para refrigeración y 11% para calefacción a lo largo del año es posible, con reducciones de la temperatura superficial de hasta 15 °C respecto a una cubierta acabada con materiales tradicionales.

Adicionalmente, la presencia de una azotea verde, produce otros beneficios indirectos en el edificio y la ciudad, al reducir los picos de consumo de electricidad durante las horas más cálidas del verano, mitigando el estrés sobre las redes de distribución (Lee et al., 2007).

1.3.6 Protección de la cubierta

La protección frente a los elementos y la prevención de entradas indeseadas de agua a los edificios es una de las funciones primordiales de las cubiertas, más aún en el caso de las cubiertas verdes. Si se produce un fallo en las láminas impermeables, sería necesario desmontar las distintas capas para poder localizarlo y repararlo (Bianchini y Hewage, 2012) con los elevados costes que eso conlleva (Minke, G. (2005).

Por consiguiente, un correcto diseño y una correcta ejecución de los estratos que las conforman, especialmente de la membrana principal junto a su correspondiente protección anti raíces, serán fundamentales para prevenir futuras patologías derivadas de las filtraciones de agua en el edificio (Osmundson, T. 1999).

Bien es cierto, según afirma Scholz-Barth (2001), que en los inicios del movimiento en pos de la eficiencia energética de los edificios, en la década de 1970, las primeras cubiertas verdes modernas, no estaban correctamente aisladas e impermeabilizadas y las humedades y patologías eran más comunes, tanto que muchas de estas cubiertas fueron sustituidas al cabo del tiempo por los altos costes de mantenimiento. Sin embargo, según esta autora, la situación actual es muy diferente puesto que la industria cuenta con unos productos mucho más avanzados y los controles de calidad en obra han reducido enormemente las patologías derivadas de la naturaleza de la cubierta.

Es partiendo de esta misma premisa que diversos autores afirman que las cubriciones vegetales aumentan la durabilidad de las impermeabilizaciones de cubierta (Getter & Rowe, 2006) (Feng C. Q. Meng Y. Zhang 2010) (Scholz-Barth, K. 2001) (Minke, G. (2005) (Dvorak y Volder, 2012). Este efecto de prolongación de la vida útil de las láminas se debe en gran parte al menor estrés térmico-mecánico que deben resistir al reducirse, por un lado, la exposición a la radiación ultravioleta y por otro las variaciones de temperatura sobre las capas inferiores de

la cubierta (Feng et al., 2010) (Wong, N.H. Tay, S.F. Wong, R.X. Ong, C.L. Sia, A. 2003) (Dvorak y Volder, 2012).

Además, si bien es cierto que las cubiertas verdes cuestan aproximadamente el doble de una convencional, según Getter y Rowe (2006) su vida útil es también dos veces superior, 40 frente a 20 años, pudiendo incluso llegar a triplicarla (Scholz-Barth, K. 2001). Por tanto, en un análisis de coste-beneficio a largo plazo habría que tener en cuenta su ventaja adicional en términos de eficiencia energética, lo que supondría un ahorro económico neto a lo largo de su vida útil.

1.3.7 Atenuación del ruido

Las superficies duras de las calles y los edificios no son buenos absorbentes acústicos y tienden a reflejar el ruido urbano, mientras que la vegetación, a través de la superficie de sus hojas y tallos, consigue reducir la intensidad del sonido ambiente (Olgyay, V. 1998) (Getter & Rowe, 2006). Las cubiertas verdes también producen este efecto, tal y como demuestra el estudio que Dunnett y Kingsbury (2004) llevaron a cabo en el aeropuerto de Frankfurt. En el experimento realizado se observó que una cubierta verde de 10 cm. de espesor conseguía atenuar el nivel sonoro en 5 dB.

Pero sus ventajas acústicas no derivan únicamente de la absorción de la vegetación, que bloquea las frecuencias más altas. Las capas de drenaje y sustrato también actúan como elemento de aislamiento al ruido exterior, bloqueando especialmente las bajas frecuencias, llegando a reducir hasta 40 dB con tan solo 12 cm. de espesor de sustrato (Peck, S. Kuhn, M. 2001).

1.3.8 Aumento del valor de los edificios

Las cubiertas vegetales no sólo aportan beneficios ecológicos a los edificios y las ciudades sino que también pueden aportar beneficios económicos a sus propietarios y ocupantes. Según Wong et al. (2003), las azoteas verdes aumentan el valor de los edificios, aumentan sus posibilidades y atractivo de venta y pueden ahorrar costes de explotación empresarial según el tipo de actividad que se desarrolle (Osmundson, T. 1999). Por ejemplo, los propietarios podrían obtener mejores alquileres en oficinas o apartamentos y los hoteles obtendrían cargar un

premium de aquellas habitaciones con vistas a una zona ajardinada en comparación con una cubierta tradicional sin gran atractivo (Getter & Rowe, 2006) (Peck y Kuhn, 2001).

Además está demostrado que en los lugares de trabajo, los empleados que están más satisfechos con el entorno físico son más proclives a producir mejores resultados (Kamarulzaman, N. Saleh, A. Hashim, S. Hashim, H. Abdul-Ghani, A. 2011), por lo que la utilización de cubiertas ajardinadas puede mejorar la concentración, productividad y felicidad de los trabajadores.

Por otro lado, algunos autores citan los ahorros económicos que puede suponer el utilizar la cubierta como captación de aguas pluviales para su posterior uso en el edificio para usos no potables (Farreny et al., 2011), o los numerosos estudios que avalan que los pacientes hospitalarios se recuperan más rápido cuando tienen vistas a zonas verdes que cuando sólo ven los edificios del entorno (Wong et al., 2003), acortando los tiempos de estancia y reduciendo por tanto el coste sanitario.

Desde el punto de vista social, las azoteas ajardinadas también pueden aportar valor, aunque no estrictamente económico, a los edificios. Por un lado incrementan el espacio de esparcimiento y recreación para los ciudadanos (Osmundson, T. 1999) (Minke, G. (2005). Por otro, pueden proveer zonas verdes seguras en guarderías, residencias para personas mayores, etc. Por último, pueden ser utilizadas con fines educativos y de concienciación en cursos de formación en ecología y medio ambiente.

1.3.9 Cualidades estéticas

A pesar de ser una de las cualidades más subjetivas, sin duda la estética de las azoteas verdes constituye uno de sus mayores atractivos. La mayor parte de autores coinciden en que las cubiertas vegetales modernas ofrecen interesantes posibilidades visuales (Dunnett & Kingsbury, 2004), (Getter & Rowe, 2006) aunque, como era de esperar de un aspecto tan cualitativo, no existe ningún consenso en cuanto a cómo potenciar al máximo su valor estético y en algunos casos incluso se cuestiona.

Existe en el mercado una tendencia a la uniformidad en las especies que se utilizan en cubiertas (Dunnett & Kingsbury, 2004) lo que también limita su

diversidad visual. Este hecho viene motivado en parte porque las soluciones estandarizadas que emplean las empresas especializadas contienen mezclas de plantas muy similares pero también en parte por los reducidos espesores de sustrato que se manejan generalmente en estas intervenciones,

Sin duda, la tipología que más posibilidades estéticas presenta son las cubiertas intensivas, puesto que llegan a convertirse en auténticos jardines en altura, permitiendo una amplia selección de tapizantes, arbustos e incluso árboles, por lo que su composición, geometría, colorido, contraste y variedad es prácticamente ilimitado. Estas cualidades vienen sin embargo acompañadas de una necesidad intensiva de riego y mantenimiento (Dunnett & Kingsbury, 2004), de lo que deriva su nombre.



Figura 1.04. Azotea vegetal intensiva de la empresa Zinco en el Campus Nacional de Arqueología de Israel. Fuente: <https://zinco-greenroof.com/references>.



Figura 1.05. Cubierta verde extensiva en la azotea de un edificio de una planta en Alicante. Fotografía tomada por el autor el 10 de octubre de 2016.

En el extremo opuesto, las cubiertas extensivas, campo donde el género *Sedum* es dominante, pueden conseguir muy buenas coberturas vegetales con un mantenimiento mínimo pero cuentan con un período de floración muy corto aunque intenso (Dunnett & Kingsbury, 2004), lo que puede conllevar un aspecto algo monótono el resto del año. Además, su reducido espesor no permite a las plantas desarrollarse en altura sino únicamente en horizontal, por lo que construyen únicamente espacios bidimensionales.

En el punto medio, las cubiertas semi-extensivas cuentan con más posibilidades estéticas que las extensivas, al tener más variedad vegetal disponible, al tiempo que conservan unas necesidades de mantenimiento moderadas.



Figura 1.06. Cubierta ecológica semi-extensiva diseñada por Clements, A. M. para el Edificio del Tesoro⁹, en Atenas. Fuente: <http://www.oikosteges.gr>.

1.4 HISTORIA DE LAS AZOTEAS VEGETALES.

La naturación o vegetación de las cubiertas es un fenómeno que ha ocurrido desde que la humanidad abandonó las cuevas y construyó sus primeros refugios, tanto inadvertidamente, como por intenciones de diseño (Clements, A.M. 2010).

⁹ La cubierta del Edificio del Tesoro fue monitorizada y sus resultados junto con otros edificios fueron presentados por su autor en el World Green Roof Congress de Londres en 2010. Los ahorros referidos son de hasta un 9% en refrigeración y alrededor de un 4% en calefacción.

A pesar de que han sido necesarios importantes avances constructivos y tecnológicos para la implementación de las cubiertas verdes en los edificios actuales, estos jardines en altura no son exactamente una idea moderna (Zanni, E. 2008) (Getter & Rowe, 2006) (Peck & Kuhn, 2001) (Thuring, C. Dunnett, N. 2014).

Originalmente los propósitos de su construcción pudieron ser, entre otros, añadir aislamiento a los edificios, servir como monumentos religiosos o simplemente como vía de escape del bullicio de las ciudades (Magill, J. Midden, K. Groninger, J. Therrell, M. 2011).



Figura 1.07. Sepulcro de corredor de Newgrange, Irlanda. Fechado en el 2300 a.C. Fuente: knowth.com.

Tradicionalmente, en climas fríos como el norte de Europa e Islandia, las cubiertas de hierba ayudaban a mantener el calor en el interior de las viviendas, mientras que en climas cálidos como en el Mediterráneo o en África, conseguían refrescar los edificios (Peck y Kuhn, 2001) (Minke, G. 2005).

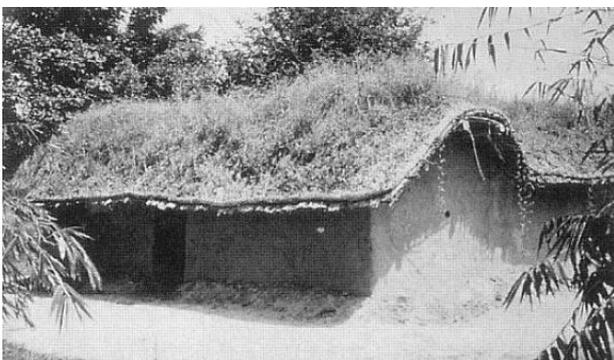


Figura 1.08. Cubierta vegetal en una vivienda en Tanzania. Fuente: Minke, G. 2005.

Aunque que no haya sobrevivido prácticamente ninguna evidencia física, debido en parte a su propia naturaleza, las repetidas menciones a los jardines en altura en textos clásicos constituyen una prueba bastante fiable de su existencia incluso en épocas remotas (Osmundson, T. 1999) (Zanni, E. 2008).

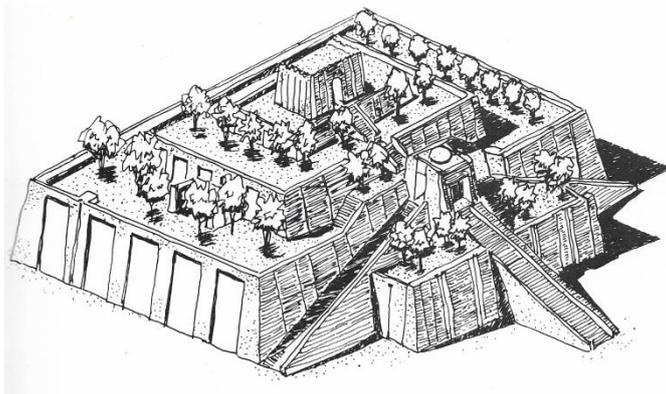


Figura 1.09. Recreación del estado original del todavía existente zigurat de Nanna (c. 2100 a.C.) en la antigua ciudad sumeria de Ur, actual Irak. Fuente: Osmundson, T. 1999.

Las primeras referencias históricas a jardines por encima del nivel del suelo realizados por el hombre, habrían sido los zigurats de la antigua Mesopotamia, construidos entre el cuarto milenio y el año 600 a.C. Se trataba de pirámides escalonadas cuya misión era acercar al cielo el templo que albergaban en su cima. Según los descubrimientos arqueológicos, en estas terrazas escalonadas se plantaban árboles y arbustos para hacer más liviana la ascensión y mitigar el caluroso clima de la llanura Babilónica (Osmundson, T. 1999).

Sin embargo, el ejemplo de cubierta vegetal más célebre de la Antigüedad es sin ninguna duda el de los Jardines Colgantes de Babilonia que se pudieron haber construido cerca del río Éufrates entre el 605 y 562 a.C. Aunque nombrados como una de las Siete Maravillas de la antigüedad por los clásicos (Zanni, E. 2008) y relatados por escritores griegos y romanos, todos ellos bastante posteriores como Diodoro de Sicilia, Estrabón, Antípater, Flavio Josefo, Quintus Curtius Rufus y Filón de Bizancio, su existencia real o su localización no están completamente probadas (Osmundson, T. 1999) (Dalley, S. 2013).

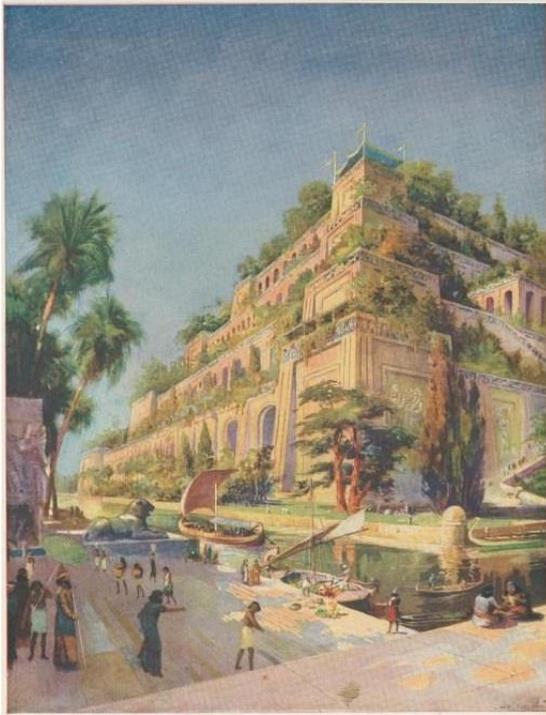


Figura 1.10. Ilustración de Sheldon, C.M. (1924). *Bella recreación de los Jardines colgantes de Babilonia*. The New York Public Library. Descargado desde: <http://digitalcollections.nypl.org/items/510d47e4-4d45-a3d9-e040-e00a18064a99>

Probablemente levantados por Nabucodonosor II durante la reconstrucción de Babilonia, se trataría de terrazas escalonadas realizadas sobre un edificio abovedado y sustentado por columnas, dando la impresión de que el jardín se encontraba suspendido en el aire (Dalley, S. 2013). Pudieron tener una superficie de más de 1.000 m² y una altura máxima de 25 m., desde los que se contemplaba una panorámica del río y valle circundante por encima de las murallas de la ciudad.

Así los describe, Diodoro de Sicilia, escritor romano contemporáneo de Julio César:

“Y se encontraba también junto a la acrópolis el jardín llamado «colgante», que lo había construido no Semíramis sino un rey sirio posterior como obsequio a una concubina; afirman que ésta, persa de raza, añoraba los prados de las montañas y pidió al rey imitar las particularidades del territorio persa mediante la destreza del cultivo. El parque se extiende hasta cuatro pletros por cada lado y posee una subida

montañosa y unas edificaciones sobre otras, de manera que el aspecto es parecido a un teatro. Debajo de las rampas construidas, se edificaron galerías que sostienen todo el peso del cultivo, elevadas poco a poco unas sobre otras siempre un pequeño trecho a lo largo de la subida; y, siendo la galería de lo alto de cincuenta codos de altura, tenía sobre ella la superficie más alta del parque, igual que el circuito de las defensas. Después, los muros, contruidos suntuosamente, tenían un espesor de veintidós pies y, cada uno de los pasadizos intermedios, la anchura de diez. Y cubrían los techos vigas de piedra, con de una longitud de dieciséis pies con las superposiciones, y de una anchura de cuatro. La techumbre sobre las vigas tenía primero caña extendida con mucho asfalto y, después de eso, doble ladrillo cocido unido con yeso y recibía, como tercera capa, cubiertas de plomo para que no penetrara en espesor la humedad del terraplén. Sobre éstas, fue amontonado un espesor adecuado de tierra, suficiente para las raíces de los árboles más grandes. El suelo nivelado estaba lleno de árboles de todas clases capaces de seducir el ánimo a sus observadores por su tamaño y sus otras gracias. Las galerías, que recibían luz por la elevación de unas sobre otras, tenían muchas y variadas estancias regias de todas clases; pero había una con aberturas desde la superficie más alta y con máquinas para la captación de las aguas, mediante las cuales se extraía gran cantidad de agua del río, no pudiendo ver lo sucedido nadie desde el exterior."

Diodoro de Sicilia. *Biblioteca histórica*, Libro II, Cap. 10. Párrafo 1-6

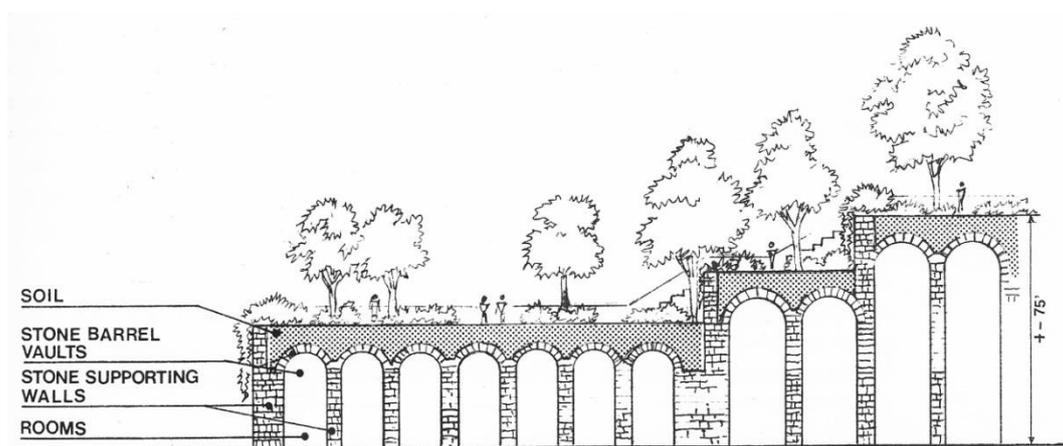


Figura 1.11. Sección ilustrativa de los Jardines Colgantes de Babilonia según las descripciones del arqueólogo Robert Koldewey's. Fuente: Osmundson, T. 1999.

Ya de época romana, se han conservado hasta nuestros días indicios de otras varias cubiertas verdes. A corta distancia de las puertas de Pompeya y Herculano, la Villa de los Misterios, quedó preservada por 4 metros de cenizas tras la explosión del Vesubio en el año 79 d.C. En ella los arqueólogos encontraron una gran terraza que rodea la planta superior de la vivienda por tres de sus lados y en la que las plantas crecían sobre un sustrato de tierra. Bajo esta terraza existía una galería de arcos que creaban una zona fresca y umbría, utilizada como refugio de las altas temperaturas en época de verano (Osmundson, T. 1999).



Figura 1.12. Restos arqueológicos de una cubierta ajardinada en la Villa de los Misterios 79 d.C., en las afueras de Pompeya. Fuente: Osmundson, T. 1999.

Otros ejemplos de época imperial de jardines en cubierta son los mausoleos de Augusto y Adriano en Roma que a pesar de sólo haber sobrevivido parcialmente, han podido ser identificados como azoteas vegetales y las crónicas de la época hacen incluso mención a los árboles que fueron importados para su cubrición (Magill et al., 2011).

Durante la edad Media también existieron algunos jardines en altura, como los de la abadía de Mont-Saint-Michel en Francia. En ella, los monjes Benedictinos, en su intento por aprovechar el soleamiento y el espacio en la reducida isla donde se ubica, recurrieron a los espacios de cubierta escalonados en el edificio para colocar sus plantaciones (Osmundson, T. 1999).



Figura 1.13. Jardines en una cubierta de la abadía de Mont-Saint-Michel. Fuente: Osmundson, T. 1999.

Durante el Renacimiento continúa en Italia también esta tradición de jardines “colgantes” en lugares como el Palazzetto Venezia, construido en Roma en siglo XV (Capel Velázquez, A. 2004) (Granados, H. 2006) (Zanni, E. 2008) para el Papa Pablo II y que contaba con un *viridarium* en dos alturas, demolido en 1910 (Majanlahti, A. Osti Guerrazzi, A. 2014), el Palazzo Piccolomini en Pienza, impulsado por el Papa Pío II entre 1458 y 1464 o la impresionante Torre dei Guinigi en Luca, con sus cuatro ejemplares de roble plantados a una altura de 35m sobre el nivel de la calle, de los que no se tiene fecha exacta de instalación, pero que ya aparecen en dibujos de la ciudad de 1660 (Osmundson, T. 1999).



Figura 1.14. Vista de la Torre dei Guinigi. Lucca. Fuente: <http://tourism.lucca.it>.

Al otro lado del Atlántico, de la ciudad Azteca de Tenochtitlán, actual México DF, también se tienen relatos de cubiertas vegetales existentes previas a la llegada de Hernán Cortés en 1521 (Osmundson, T. 1999). Al parecer, también en aquel tiempo sufría la ciudad el mismo problema moderno: la falta de espacio a nivel de suelo y este hecho pudo contribuir al uso de las cubiertas como espacio adicional para la jardinería o la agricultura.

A partir de 1681 se construyen también los jardines elevados del antiguo palacio del Kremlin en Moscú, reemplazado por el actual en 1773. Divididos en un piso superior y otro inferior y situados sobre edificios abovedados de piedra, tenían una extensión de 4 y 2,4 hectáreas respectivamente, contando incluso con estanques y fuentes. Sólo para la impermeabilización del jardín superior, de 122m de largo, se tuvieron que emplear 10.24 toneladas de plomo en forma de láminas soldadas entre sí y debido al peso las habitaciones inferiores se reforzaron estructuralmente con apoyos y vigas de gran canto (Osmundson, T. 1999) (Magill et al., 2011).

También encargados por la nobleza encontramos otros ejemplos de jardines sobre elevados de esta época. En 1764, al poco de convertirse en emperatriz de Rusia, Catalina II comisionó al arquitecto italiano Francesco Rastrelli la construcción de un jardín sobre la cubierta de los establos del Palacio de Invierno en San Petersburgo, para albergar su colección de arte (Osmundson, T. 1999), hoy parte del Hermitage, uno de los museos de arte más importantes del mundo.

También el rey Ludovico II de Baviera se hizo construir en el siglo XIX una cubierta verde con un invernadero de cristal en la azotea de un edificio en Múnich. Sin embargo, los problemas de estanqueidad que provocaba su deficiente impermeabilización con planchas de cobre, hicieron que fuera desmontado en 1897 (Osmundson, T. 1999).

Otro ejemplo remarcable, por constituir precisamente un avance técnico en la impermeabilización, es la cubierta vegetal que el constructor Karl Rabbitz diseñó para una residencia en Berlín a finales del siglo XIX. Entendiendo la naturaleza de los problemas asociados a las azoteas ajardinadas, Rabbitz patentó un cemento vulcanizado para sellar el tejado, algo que le llevó incluso a exhibir su sistema en la Exposición Universal de París en 1867 (Osmundson, T. 1999).

Por otro lado, la arquitectura popular también ha dado numerosas actuaciones vegetales en cubiertas con fines muy distintos. Empleados desde hace

cientos de años, de los siglos XVII y XVIII sobreviven todavía en Noruega cabañas con techados cubiertos de tierra para mejorar el aislamiento, a los que se añaden herbáceas, gramíneas, y otras especies para fijar y estabilizar el sustrato (Getter & Rowe, 2006).



Figura 1.15. Recreación de vivienda de turba Eiríksstaðir en Haukadalur, Islandia. Fuente: http://www.hurstwic.org/history/articles/daily_living/text/Turf_Houses.htm.

En Canadá también se pueden visitar ejemplos similares, supuestamente importados por los vikingos y más tarde por los colonos franceses de Nueva Escocia y Terranova (Peck y Kuhn, 2001).

Del mismo modo, los primeros pioneros americanos de las Grandes Praderas también utilizaron este método en la segunda mitad del XIX, como medida de construcción temporal debido a la falta de madera y otras materias primas. En 1876, más del 90% de los habitantes del condado de Butler en Nebraska habitaban en viviendas construidas con este método (Magill et al., 2011). Sin embargo, su deficiente impermeabilización hizo que su uso fuera cada vez menos frecuente tras la llegada de mejores materiales de construcción una vez se construyó el ferrocarril transcontinental (Osmundson, T. 1999) (Getter & Rowe, 2006).



Figura 1.16. Vivienda de turba con cubierta vegetal en las llanuras de Estados Unidos c.1896. Fuente: North Dakota State University Libraries, Institute for Regional Studies.

Sin embargo, las cubiertas vegetales modernas nacen en Alemania a finales del siglo XIX ligadas a las mejoras tecnológicas en impermeabilización. Alrededor de la década de 1880 el país experimentó un gran crecimiento industrial y una rápida urbanización lo que llevó a la construcción de un gran número de viviendas de muy bajo presupuesto y calidad (Getter & Rowe, 2006). En muchas ocasiones se impermeabilizaban las cubiertas con alquitrán, que al ser altamente inflamable podía provocar incendios. Para reducir este riesgo, un contratista alemán, llamado Koch, desarrolló una solución. Como elementos de protección a la impermeabilización, añadió una capa de arena y grava donde pudieron crecer especies colonizadoras, creando involuntariamente las primeras cubiertas vegetales modernas (Rahman, S. Ahmad, H. 2012) (Getter & Rowe, 2006). En el año 1980, 50 de estas cubiertas todavía estaban en pie y en perfectas condiciones en la ciudad de Berlín (Getter & Rowe, 2006) (Rahman y Ahmad, 2012).

En Estados Unidos, también a partir de esta década podemos encontrar utilizaciones muy exitosas de azoteas parcialmente ajardinadas utilizadas para el ocio y recreo durante el verano. Basándose en la idea de los veraniegos teatros-jardín o *garden theatres* situados a nivel del terreno que habían proliferado en las afueras de Nueva York, donde el terreno era asequible, Rudolph Aronson, músico y empresario del espectáculo, decidió en 1880 construir el Casino Theatre en Broadway. En él reunía el clásico teatro cubierto para el invierno y un teatro al

abierto para el verano en su azotea en un entorno ajardinado. De esta forma conseguía evitar los altos costes del suelo a nivel urbano en el centro de la ciudad o tener que trasladar sus obras a las afueras durante los meses más cálidos. Ocho años más tarde se construyó con una disposición similar el primitivo Madison Square Garden que también contaba con una cubierta ajardinada para las representaciones estivales (Osmundson, T. 1999). Su sucesor, el moderno pabellón multiusos no contiene ningún jardín, pero conserva en su nombre la esencia del teatro original que se alzaba en la misma ubicación.



Figura 1.17. Cubierta jardín en el American Theater en Broadway, Nueva York. 1880. Fuente: Osmundson, T. 1999.

La fiebre de las azoteas jardín en el Nueva York de 1890 era tal que hasta nueve teatros en cubierta llegaron a operar al mismo tiempo. Algunos de ellos tenían incluso cubiertas de vidrio practicables para proteger a los espectadores de posibles tormentas y disponían de palmeras, enredaderas y otra vegetación en jardineras y cursos de agua que refrescaban el ambiente y enmascaraban el ruido de la ciudad (Osmundson, T. 1999).

Años más tarde y a pesar de la Gran Depresión, en la década de los años 30 del siglo XX, aparecieron también en Nueva York nuevos usos lúdicos para las cubiertas vegetales en hoteles, restaurantes y oficinas, siendo unas de las más reconocidas las azoteas ajardinadas que Ralph Hancock diseñó sobre el séptimo

piso del Rockefeller Center en 1934, de las que hoy sólo se conserva una pequeña porción (Capel Velázquez, A. 2004)



Figura 1.18. Visualización y vista del Rockefeller Center, Nueva York. Fuente: Osmundson, T. 1999.

En Europa sin embargo, el clima económico y las dos Guerras Mundiales sí ralentizaron la proliferación de la naturación de cubiertas. No obstante, en lugares como Gran Bretaña se emplearon las cubriciones vegetales por sus cualidades de camuflaje durante la II Guerra Mundial, utilizándolas sobre hangares en aeródromos militares (Magill et al., 2011).

También en la primera mitad del siglo XX, Le Corbusier nombra la cubierta plana y ajardinada entre sus cinco puntos de la Nueva Arquitectura (Le Corbusier, 1923) (Boesiger, W. Girsberger, H. 1987) (Ascione et al., 2013). Es uno de los arquitectos modernos que construyó regularmente edificios con cubiertas ajardinadas e incluso inundadas sobre forjados de hormigón (Boesiger y Girsberger, 1987) (Capel Velázquez, A. 2004), aunque las funciones de su cubierta no se limitan sólo a la inclusión de vegetación sino que plantea más bien la azotea como un espacio más de las viviendas.

Como ejemplo, la cubierta de su Villa Savoye (1928-31) en Poussy, Francia, contiene parterres elevados para alojar una vegetación permanente, pero el propósito principal de la azotea plana es la de experimentar y admirar la naturaleza circundante, desde una cómoda posición doméstica.

Por el contrario, en el diseño del Museo de Ahmedabad, India, obra de 1951, los condicionantes climáticos predominaron en el diseño de una cubierta que protegiera de la excesiva temperatura del día y refrescara naturalmente el espacio exterior, aprovechando la sequedad del ambiente.

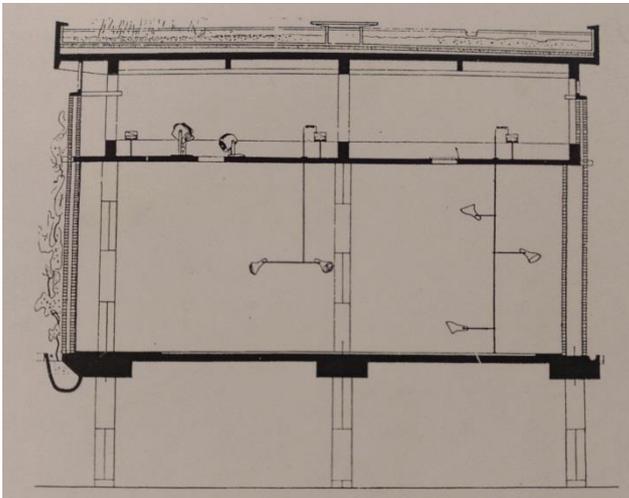


Figura 1.19. Sección del Museo de Ahmedabad de Le Corbusier donde se puede apreciar la cubierta inundada con vegetación acuática que se proyectó. Fuente: Boesiger, W. Girsberger, H. 1987.

En su concepción constaba de 45 estanques de 50 m² cada uno con una profundidad de agua de 40 cm., donde crecería vegetación de distintos colores que además proyectaría sombra sobre el agua, manteniendo su temperatura lo más baja posible. Las plantas se desarrollarían exuberantemente gracias a una sustancia especial que haría que los ejemplares superasen su tamaño normal.

La idea parece ser que partió de una conversación alrededor de 1930 con el Director del Instituto Pasteur en Paris, que Le Corbusier ignoró entonces pero que rescató años más tarde (Boesiger y Girsberger, 1987). Sin embargo, poco se sabe de esta cubierta hidropónica, y no está claro hasta qué punto se consiguió

realmente implementar en la época de construcción del edificio (Arato Gonçalves, A. McCoy, C. Macdonald, S. 2018).

A partir de la misma década de 1950, el arquitecto y artista austríaco Friedrich Stowasser, más conocido como Friedensreich Hundertwasser, realizó numerosas obras donde las cubiertas verdes y las fachadas vegetales tienen una destacada presencia. Fue pionero en el movimiento puramente ecologista de la naturación urbana, dejando su huella principalmente en países como Austria, Alemania, Francia, Suiza y Noruega (Zanni, E. 2008). Sus obras celebran la capacidad de la naturaleza de transformar el ecosistema urbano y abogan por el respeto de la vegetación sin intentos de corregirla por parte del hombre.

Por su parte, Reinhard Bornkamm, un investigador de la Universidad de Berlín habitualmente llamado el padre de las modernas cubiertas verdes, comenzó en la década de 1960 por estudiar la vegetación presente en las todavía existentes cubiertas construidas antes de las guerras mundiales por Koch y construyó los primeros modelos a gran escala de azoteas vegetales intensivas y extensivas en un edificio de su Universidad, que desafortunadamente tuvo que ser desmantelado años después por falta de fondos para su mantenimiento (Rahman y Ahmad, 2012).

A partir de los años 70 las cubiertas verdes, especialmente las extensivas, se establecieron en Centroeuropa, como un referente del nuevo movimiento de arquitectura ecológica y se diferencian de sus antecesores en que son sistemas ligeros y de poco espesor, diseñados como soluciones socio-ambientales para el ecosistema urbano (Thuring y Dunnett, 2014). Como contrapartida, la mayor parte de la investigación científica se realizó en Alemania, Suiza y Escandinavia y no se escribió en inglés (Osmundson, T. 1999), por lo que su difusión fue más complicada.

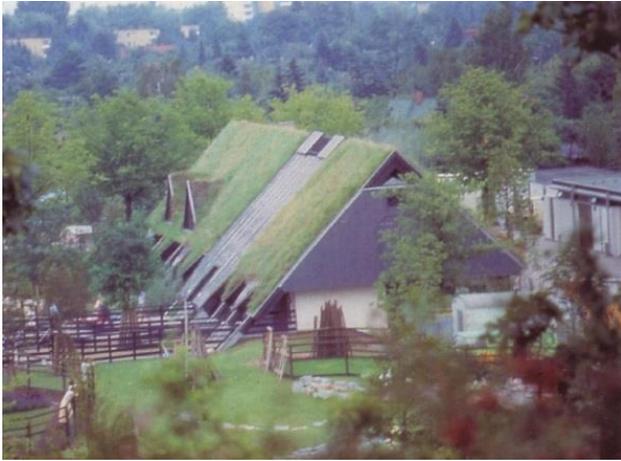


Figura 1.20. Cubierta verde inclinada en la Exposición Federal del Jardín en Berlín. Año 1985. Fuente: Minke, G. 2005.

En concreto, Alemania lideró las innovaciones tecnológicas y desde 1975 la creación de estándares de construcción que emplearan cubiertas vegetales a través de la Sociedad para el Diseño y Desarrollo del Paisaje, o FFL, de sus siglas en alemán. Además, sus legisladores federales y regionales impulsan la creación de azoteas ajardinadas en todo el país, donde se ejecutan anualmente más de 13 millones de m², suponiendo un 14% del total de cubiertas existentes (Thuring y Dunnett, 2014).

En la actualidad las Guías de Diseño elaboradas por la FFL son adoptadas como referentes en todo el mundo. Sin embargo, como se desarrollará en capítulos posteriores, su transposición directa a climas mucho más cálidos y secos que el de Centroeuropa podría suponer un impedimento para su correcta implementación.

II – ESTADO DE LA CUESTIÓN

II – ESTADO DE LA CUESTIÓN

Dados sus numerosos beneficios, no es extraño que las cubiertas vegetales hayan ganado aceptación entre técnicos, administraciones y público en general, incluyendo en zonas de climas cálidos y secos. Sin embargo, por su propia naturaleza, estos sistemas podrían requerir agua para su mantenimiento y desarrollo (Schweitzer & Erell, 2014). Mientras esto puede no suponer un problema en algunos climas, la creciente escasez de este recurso en algunas regiones como el Mediterráneo, limitan su implementación racional a menos que sean completamente autosuficientes. O incluso, que en caso de que requieran riego adicional en determinados períodos para sobrevivir, sus beneficios superen ampliamente a sus costes.

Puesto que la cubierta verde extensiva o semi-extensiva es una solución bioclimática tradicional originaria de zonas más frías, utilizada para incrementar el aislamiento (Zinzi & Agnoli, 2012) y su versión moderna fue desarrollada principalmente en Alemania, la aplicación directa de las prescripciones y normativas de climas continentales no es conveniente ya que una solución que, en teoría, debiera ser sostenible o ecológica, podría convertirse en una carga desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, está comprobado que también pueden representar oportunidades en climas cálidos, debido a su comportamiento frente a la radiación solar (Zinzi & Agnoli, 2012).

Sorprende, por tanto, que sea tan limitada la publicación de normativa y la literatura científica que desarrolle unas pautas claras de diseño aplicables a climas cálidos y semi-áridos donde puede ser imprescindible el aporte de agua de riego y donde resulta clave el mantenimiento.

Este problema viene en parte generado por la difusión y adopción sin modificaciones de sistemas comerciales estandarizados que provienen de zonas templadas del continente, donde se lleva a cabo la mayor parte de la investigación empresarial.

Aun así, según los pocos autores que investigan estas soluciones en zonas cálidas, los efectos beneficiosos de las cubiertas verdes siguen siendo indiscutibles (Ascione et al., 2013) (Gagliano et al. 2014). La inercia térmica adicional, el refrescamiento evaporativo y el retraso térmico (time lag) mejoran el comportamiento de los edificios en los cálidos veranos. Sin embargo, estos factores deberían ser cuantificados con exactitud y habría que tomar en consideración también los posibles costes de mantenimiento elevados, principalmente si existe necesidad de riego artificial.

Del mismo modo, tanto la literatura científica generalista, como estas soluciones estándar disponibles en el mercado parecen pasar por alto el componente hídrico, tan importante en algunas regiones del planeta, y se centran principalmente en sus propiedades energéticas o estéticas.

Además, no sólo el agua es un bien escaso en muchos países, sino que su producción y abastecimiento conllevan un alto gasto energético, con lo que los ahorros energéticos potenciales de las cubiertas verdes podrían verse eclipsados por la energía embebida en el agua aportada, en caso de necesidad de riego. Se hace evidente por tanto, que el binomio energía-agua constituye un campo de estudio fundamental para entender la sostenibilidad de una solución *ecológica* como las cubiertas verdes.

Sin embargo, una revisión exhaustiva de la bibliografía disponible sobre esta cuestión también demuestra que los trabajos científicos que relacionan la eficiencia energética con el consumo de agua de este tipo de cubiertas son muy escasos y parciales, aplicables solo a una determinada tipología constructiva o especie vegetal.

Por ejemplo, estudios como los llevados a cabo por Neila et al. (2008), Olivieri et al. (2013) o Ascione et al. (2013) evalúan un gran rango de soluciones constructivas y vegetales para las cubiertas verdes en regiones Mediterráneas. Como contrapartida, estos estudios no aportan datos de consumo de agua necesario para su crecimiento y supervivencia, además de situar sus cubiertas experimentales en zonas con un régimen de precipitaciones más abundantes que la estudiada en esta investigación.

En concreto, Neila, F. Bedoya, C. Acha, C. Olivieri, F. Barbero, M. (2008) publicaron los ahorros energéticos que producía su cubierta ecológica jardín, pero en el estudio no aportan los datos de consumo de agua para abastecer el aljibe

intermedio, con lo que el impacto económico y energético global de su solución no se puede estimar.

Otros muchos estudios como Zinzi y Agnoli (2012), Ascione et al. (2013), desarrollan modelos teóricos para evaluar la eficiencia energética de estas cubiertas, partiendo de una vegetación con valores estandarizados, basados en modelos de EnergyPlus, pero no evalúan a la vez el coste que supondría mantener una vegetación con esa específica densidad, follaje, etc. Tampoco cuestionan qué especies concretas cumplirían esos requisitos, sus necesidades de riego, fertilizantes o mantenimiento. Además, el modelo matemático de cubierta vegetal Energy Plus es monodimensional y basado en algunas simplificaciones (Zinzi & Agnoli, 2012).

Aun así, existen otros trabajos realizados a través cálculos por ordenador, que si bien son puramente teóricos, utilizan estos modelos matemáticos tanto para calcular las reducciones de demanda energética como para predecir el riego adicional que será necesario aportar a la vegetación para su correcto desarrollo y supervivencia.

En concreto, algunos estudios en Italia (Fioretti et al., 2010) analizan la relación entre el ahorro energético y el comportamiento hídrico de dos cubiertas experimentales, poniendo énfasis en el impacto del follaje sobre la radiación incidente y la temperatura en la superficie.

Lamentan también algunos autores, como Ascione et al. (2013), que no exista apenas literatura científica que investigue a fondo el tema de los análisis de viabilidad ni provea de datos de rendimientos económicos y energéticos a la vez, algo muy importante para edificios nuevos, pero fundamental para rehabilitaciones.

En su caso específico, los autores realizan un estudio teórico donde calculan el ahorro energético y el gasto de agua de dos tipologías de azotea verde en varias localizaciones europeas. Sus cálculos para dos tipologías de cubierta en la ciudad de Sevilla arrojan datos poco esperanzadores. Según los autores, a pesar del 11% de reducción de demanda energética que se calcula, el gasto de agua, 640 l/m²a para plantas del género *Sedum* y 1.1145 l/m²a para gramíneas, haría que ambas soluciones fueran poco rentables económicamente.

Por último, una tercera rama de estudios, como Metselaar, K. (2012) o Farrell, C. Mitchell, R. E. Szota, C. Rayner, J. P. Williams, N. S. (2012), se centran en la incidencia del tipo de sustrato, vegetación y sus efectos en el balance hídrico del sistema, pero a su vez no relacionan estos parámetros con su eficiencia energética.

Sí existen sin embargo, investigaciones experimentales completas, como la realizada por Schweitzer y Erell (2014) con probetas reales que simulan cubiertas verdes, que sí estudian esta relación entre agua y energía. En su caso apuntan a la necesidad de un aporte tan significativo de agua en climas muy áridos, que lleva a los autores a cuestionar si los beneficios superan a los inconvenientes. No obstante, este estudio, tal y como los propios autores indican, es muy sesgado, ya que la experimentación se llevó a cabo exclusivamente con un tipo de sustrato y cuatro especies diferentes de plantas autóctonas de Israel.

Como norma general, los datos de la mayor parte de estudios a escala real existentes son difíciles de extrapolar a otras situaciones ya que son muy parciales en el tiempo o solo consideran el período en que la vegetación está en su máximo desarrollo (Olivieri, F. Di Perna, C. D'Orazio, M. Olivieri, L. Neila, J. 2013).

Adicionalmente, el hecho de que estas soluciones dependan en gran medida del comportamiento de organismos vivos, también ha generado dudas sobre su uso, especialmente en regiones donde el desarrollo de las plantas está severamente condicionado por el clima (Bevilacqua. P. Coma, J. Pérez, G. Chocarro- C. Juárez, A. Solé, C. De Simone, M. Cabeza, L. 2015) y la necesidad de riego artificial podría existir e incluso llegar a ser muy alta (Ascione et al., 2013) (Schweitzer & Erell, 2014).

Tal y como se ha demostrado en algunos experimentos (Coma, J. Pérez, G. Castell, A. 2014) en algunos casos y para determinados climas, incluso con riego, la cobertura vegetal que se alcanza en las cubiertas verdes es tan solo del 20%, lo que evidencia la falta de un diseño específico para zonas cálidas y áridas.

De la misma forma, Dvorak y Volder (2012) comprobaron que aunque en verano la reducción de la temperatura bajo un módulo de cubierta vegetal sin riego en Texas era muy significativa a pesar del bajo contenido de agua del sustrato, el ratio de cobertura de las plantas fue del 50% en el mejor de los casos, aún con riego inicial hasta la fase de establecimiento.

Como conclusión, está claro que los modelos teóricos empleados habitualmente para estudiar la eficiencia energética de una tipología de cubierta concreta pueden no corresponder en absoluto con la realidad, sobrestimando los beneficios que las azoteas ajardinadas pueden aportar. Se hace, por consiguiente, necesario desarrollar estudios más exhaustivos que recojan todas estas variables en modelos reales escalables a cubiertas de edificios.

Para agravar el problema, los materiales y las distintas capas que configuran las cubiertas verdes comerciales de los distintos fabricantes son bastante similares entre sí. Sin embargo, cada empresa ha desarrollado un modelo específico y aunque existe mucha información sobre estas soluciones constructivas a nivel genérico, la mayor parte de ellas tratan la información sobre sus sistemas como secretos comerciales y no es posible conocer datos concretos sobre el contenido de los sustratos, el proceso de producción o la instalación de los mismos (Bianchini y Hewage, 2012). Se hace evidente por tanto, que es necesaria también más divulgación científica que aporte transparencia a este campo de trabajo.

Estos futuros estudios que tengan en cuenta los parámetros fundamentales que afectan al comportamiento de las cubiertas verdes en regiones cálidas como el Mediterráneo deben abordar una serie de problemáticas específicas.

Con el fin de poder ser utilizadas tanto en edificaciones nuevas como en edificios existentes en centros urbanos, con poca capacidad adicional de carga (Nektarios P. Amountzias, I. Kokkinou, I. Ntoulas, N. 2011), las investigaciones deben cuestionar cual es el espesor mínimo de sustrato que permita el desarrollo correcto de una vegetación tupida que proyecte sombra en verano, a la vez que el peso añadido sea lo más reducido posible.

Por otro lado, la composición del sustrato es también uno de las variables primordiales que definen el comportamiento de las cubiertas. Idealmente, el sustrato debe ser ligero, permitir la aireación de las raíces, pero poder retener la mayor cantidad de agua posible.

Del mismo modo, la elección de la vegetación debe ser estudiada con gran atención. Estas plantas seleccionadas deben poder resistir las condiciones extremas que se dan en las azoteas, a la vez que desarrollarse satisfactoriamente para cumplir sus funciones de tapización, sombreado y evapotranspiración manteniendo los costes de mantenimiento y riego en mínimos. Así mismo, sus

cualidades hídricas deben contribuir a paliar los efectos de las lluvias torrenciales que tienen lugar habitualmente en estas regiones áridas.

Por último, el cálculo del riego necesario, si lo fuera, constituye otro gran reto para estas tipologías constructivas. Su cantidad, regularidad y procedencia puede suponer la diferencia entre una solución constructiva costosa y otra realmente ecológica para estas zonas cálidas.

Por consiguiente, el objetivo del presente estudio es profundizar en la relación entre los diferentes parámetros que definen las cubiertas verdes, teniendo en cuenta su tipología, biología e hidrología con el fin de lograr establecer un umbral de aplicabilidad de esta solución ecológica en determinadas regiones de nuestro entorno.

III - METODOLOGÍA

III - METODOLOGÍA

3.1 OBJETIVOS

El objetivo principal que persigue este trabajo de investigación es evaluar, desde el punto de vista estrictamente cuantitativo, el comportamiento específico de las cubiertas planas con cubrición vegetal en climas secos y cálidos como el Mediterráneo, con particular enfoque en su eficiencia energética e hídrica.

Para afrontar este estudio sobre la eficiencia e idoneidad de las cubiertas vegetales, en primer lugar se estudiarán aquellos conceptos de partida que definen las azoteas ajardinadas modernas, sus beneficios y sus clasificaciones más aceptadas.

La pregunta fundamental que esta investigación trata de contestar es si, más allá de consideraciones cualitativas, los beneficios energéticos de las cubiertas verdes superan ampliamente sus posibles desventajas.

Para ello, se procederá a cuantificar el esperado ahorro energético en el acondicionamiento térmico de los edificios que se consigue al emplear este tipo de soluciones, así como el consumo de agua de estas cubiertas vegetales en función de las especies autóctonas plantadas y un sistema constructivo de formación con diferentes espesores que representen dos escenarios habituales: rehabilitación de edificios existentes y obras de nueva planta.

Por último, se persigue encontrar una fórmula matemática que relacione, mediante el uso de parámetros comparables, la eficiencia hídrica, y en consecuencia energética, de cada solución particular en función de la combinación de elementos vegetales y sistemas constructivos de protección.

Además, una vez obtenidos estos resultados, se aspira a generar un listado de soluciones de cubiertas vegetales ecológicas, adaptadas a un mínimo mantenimiento, compatibles con el clima semiárido del Mediterráneo, en función de los resultados empíricos de los ensayos llevados a cabo durante este trabajo y de los declarados en la bibliografía consultada.

3.2 INTRODUCCIÓN A LAS CUBIERTAS VERDES

El punto de partida de esta investigación será la evaluación de aquellos parámetros que definen las cubiertas vegetales ecológicas y el estudio de sus características principales. Para ello se realizará una revisión bibliográfica crítica que recogerá los beneficios que aportan estas soluciones al entorno construido y que son comúnmente aceptados por la comunidad científica. Esto permitirá clasificar las contribuciones desde el punto de vista cualitativo o cuantitativo e identificar aquellas que tienen un mayor interés desde el prisma de la eficiencia energética.

En concreto se evaluarán a continuación los dos factores que según varios de estos autores (Zinzi & Agnoli, 2012) (Palomo del Barrio, 1998) (Sailor, D.J. 2008) tienen más influencia en su resultado energético global: las reducciones en las demandas directas de climatización y el consumo de agua para riego traducido a consumo de energía.

Seguidamente, se efectuará una revisión bibliográfica exhaustiva de la literatura científica que contemple estos dos aspectos de mayor impacto en la eficiencia energética global de edificios en zonas cálidas y se identificará la problemática que se pretende abordar en esta investigación.

Además, con la intención de contextualizar la utilización en la arquitectura moderna de estas soluciones medioambientales bioclimáticas que se remontan a la Antigüedad, se realizará un breve recorrido por las cubiertas ajardinadas a través de la Historia y se evaluará la influencia que su utilización ha ejercido tanto en el desarrollo de su tecnología específica como en el imaginario colectivo de la propia disciplina arquitectónica y de la sociedad en general.

3.3 PARÁMETROS CLIMÁTICOS

Ya que se trata de soluciones fuertemente influenciadas por los factores climáticos, se acotará seguidamente el campo de estudio a unas variables climáticas particulares. Puesto que la investigación se centra en un clima Mediterráneo semi-árido, se intentará encontrar evidencia científica que respalde su aplicabilidad a regiones climáticas similares.

El método que se seguirá para unificar estas distintas zonas climáticas será el de Köppen y sus clasificaciones derivadas, por ser el sistema de referencia predominante en la bibliografía científica. No obstante, se tomarán también indicaciones de otros autores reconocidos e incluso de otras disciplinas tangenciales.

3.4 GASTO ENERGÉTICO DEL AGUA

Al tratarse de soluciones constructivas basadas en elementos vivos que dependen de la climatología para su correcto desarrollo, el uso de agua adicional de riego puede ser necesario en determinados períodos. Puesto que la intención de esta investigación es dilucidar si el balance energético global de estas soluciones es positivo, será necesario cuantificar la equivalencia en energía que supone el uso de agua de riego.

Por consiguiente, para evaluar cuál es este impacto energético del agua en la arquitectura se tomará el método de medida de la Huella Energética del agua. Esto permite conocer la cantidad de energía necesaria para producir y transportar un determinado volumen de agua hasta un edificio.

En nuestro caso particular, este dato, tomado del Ente Público del Agua de la Región de Murcia, medido en kWh/m³, permitirá una comparación directa del ahorro de energía con el gasto energético del agua necesaria para el desarrollo de las cubiertas verdes que seleccionemos como idóneas para nuestro clima de referencia.

3.5 PARÁMETROS PARA SELECCIONAR LA CUBIERTA ÓPTIMA

Una vez identificado el problema y establecidas sus condiciones de contorno, podremos, a continuación, realizar los experimentos necesarios para obtener los rendimientos reales de las cubiertas verdes en el clima semi-árido del Mediterráneo.

Sin embargo, la amplia variedad de azoteas vegetales existentes actualmente o por inventar en el futuro nos obliga a acotar previamente el campo de estudio. Con este objetivo, se procederá a una selección de soluciones iniciales

basada en aquella literatura científica publicada recientemente que recoja específicamente las variables de nuestra investigación.

Para ello, en primer lugar, se expondrán los conceptos de partida que definen las azoteas verdes y las distintas clasificaciones que a partir de ellos se generan. Posteriormente, se determinará qué tipologías se decide emplear, en función de parámetros cuantificables: peso, espesor, materiales, orden de colocación, especies vegetales, accesibilidad, mantenimiento, etc.

El objetivo último de esta revisión bibliográfica será determinar qué características físicas son más beneficiosas para las cubiertas en zonas cálidas y semi-áridas, según los resultados publicados previamente por otros investigadores y de esta forma generar una tipología lo más adecuada posible al clima Mediterráneo.

No cabe duda que uno de los factores fundamentales del correcto comportamiento de las cubiertas verdes y de su viabilidad es la elección correcta de las especies vegetales. Por tanto, para esta selección, se emplearán dos métodos complementarios:

- Por un lado, se estudiarán diferentes familias adaptadas a las duras condiciones climáticas de la zona mediante visitas de campo a tres localizaciones distintas de la Región de Murcia.
- Por otro se revisa la literatura científica tanto específica de cubriciones vegetales como de botánica regional y se seleccionan especies cuyas características coinciden con los requerimientos establecidos.

Por último, a partir de esta selección propuesta, mucho más acotada y específica para nuestras condiciones climáticas, se llevarán a cabo los cálculos y/o experimentos *in situ* considerados necesarios para obtener resultados extrapolables a cubiertas reales.

3.6 FASE EXPERIMENTAL

Una vez contextualizado el problema y fijadas la mayor parte de sus variables, se procederá a establecer dos tipologías de cubierta a estudiar, basadas en los casos más habituales encontrados en construcción: rehabilitación de edificios y obras de nueva planta.

Para realizar los dos estudios cuantitativos necesarios, energético e hídrico, de las dos tipologías seleccionadas, se estudiarán las distintas opciones que existen para llevarlos a cabo. Por un lado, se buscará que el resultado sea lo más exacto posible, para que sus conclusiones sean directamente aplicables a la realidad y por otro se sopesará su viabilidad desde el punto de vista de la economía de medios y la duración en el tiempo.

En primer lugar, para determinar el beneficio energético que las cubiertas verdes aportan a los edificios encontramos, entre otros, los siguientes métodos:

- Opción **a**: Fuentes primarias: experimentos y monitorizaciones reales con edificios construidos a escala real. Siendo sin duda este el método más exacto, su alto coste material y de tiempo nos obliga a descartarlo.

- Opción **b**: Fuentes primarias: experimentos y monitorizaciones reales con maquetas de edificios a pequeña escala. Este procedimiento, utilizado por algunos autores (Schweitzer & Erell, 2014) (La Roche, P. Berardi, U. 2014) (Fang, C. 2008) (Kotsiris, G. Androutsopoulos, A. Polychroni, E. Nektarios, P. 2012), presenta también el inconveniente de la alta inversión a realizar, a la vez que arroja resultados energéticos cuestionables, según los propios investigadores, debido a la dificultad de reproducir las condiciones físicas reales de un edificio, con su masa térmica, perfil de uso, comportamiento de los ocupantes, etc. Por tanto, también se desestima su utilización.

- Opción **c**: Fuentes primarias: simulaciones con software y procedimientos de cálculo validados por experimentos reales realizados por otros autores. Esta opción se presenta como muy interesante para establecer el uso de energía de un edificio modelo, puesto que su fiabilidad es suficientemente alta (Sailor, D.J. 2008) y sus costes son relativamente bajos. Además, permite reproducir diferentes escenarios temporales sin necesidad de extender los ensayos durante varias temporadas.

- Opción **d**: Fuentes secundarias: extrapolaciones de experimentos y simulaciones publicados en la literatura científica. Esta posibilidad se descarta por su falta de fiabilidad, a la vista del escaso número de trabajos que presenten datos completos acerca del comportamiento energético e hídrico de cubiertas verdes en zonas cálidas.

También será necesario establecer también el consumo de agua de las tipologías elegidas para el estudio. En este caso los métodos considerados son los siguientes:

- Opción a: Fuentes primarias: experimentos y monitorizaciones reales con edificios construidos a escala real. Siendo para este caso también la medición más exacta, su alto coste material y de tiempo nos obliga a descartarlo de la misma forma que para la medición de energía.

- Opción b: Fuentes primarias: experimentos y monitorizaciones reales con maquetas de cubiertas a pequeña escala. Este probablemente sea el procedimiento más utilizado por los trabajos científicos consultados y se debe fundamentalmente a dos variables. Por un lado sus costes son relativamente bajos y por otro permite simular muchas tipologías de cubierta a la vez en condiciones idénticas, algo más complicado de replicar en un edificio real, debido al uso que se realiza bajo las distintas zonas de la azotea, a sombras proyectadas por otros cuerpos, etc.

- Opción c: Fuentes primarias: simulaciones con software y procedimientos de cálculo validados por experimentos reales realizados por otros autores. Este método también sería muy interesante, puesto que permite gran cantidad de variables a la vez, pero su limitación se encuentra en que el consumo de agua está muy influenciado por los distintos factores que intervienen en el microclima y el tipo de vegetación escogida. Se desestima, por tanto, al no existir experimentos comparables con las especies vegetales autóctonas elegidas para el experimento.

- Opción d: Fuentes secundarias: extrapolaciones de experimentos y simulaciones publicados en la literatura científica. Al igual que para el cálculo energético, esta posibilidad se descarta por su falta de fiabilidad, a la vista del escaso número de trabajos que presenten datos completos acerca del comportamiento energético e hídrico de cubiertas verdes en zonas cálidas y en concreto la Región de Murcia y sus límites.

Por tanto, para conocer el balance energético global de las soluciones de cubierta escogidas, se procederá a utilizar una metodología mixta, basada en cálculos informáticos para la eficiencia energética y probetas experimentales de cubierta vegetal con especies autóctonas para la eficiencia hídrica.

3.7 CÁLCULO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para proceder a la evaluación del comportamiento energético de nuestras dos tipologías seleccionadas de cubierta verde, el primer paso será establecer un edificio ficticio de referencia. El edificio se simulará mediante modelos matemáticos en un software especializado y sobre el mismo se aplicarán diferentes escenarios constructivos, para evaluar los beneficios que aportan las cubriciones vegetales.

Se propone para ello un edificio modelo construido con métodos y materiales “tradicionales” de la zona, como base de comparación (Edificio A), para posteriormente incluir una cubierta vegetal en su sección constructiva (Edificio B). Con el fin de poder comparar de forma directa los resultados de las distintas hipótesis, se elige un modelo de edificio muy simplificado, que no añada demasiadas variables a la ecuación propuesta.

Se establece para el edificio un uso administrativo, puesto que existen algunos comparables de características similares en la literatura consultada (Karachaliou et al., 2016) (Santamouris et al., 2007) (La Roche & Berardi, 2014).

Además, debido a la complejidad de los fenómenos que ocurren en una cubierta ajardinada, los distintos modelos matemáticos posibles que simulan el comportamiento del edificio y la azotea vegetal también constituyen un factor importante a la hora de obtener resultados fiables. A continuación, se analizan por tanto las opciones más aceptadas en la literatura científica específica.

El primero de los modelos matemáticos analizados ha sido el propuesto por Palomo del Barrio (1998), que representa de forma simplificada el comportamiento térmico dinámico de cubiertas verdes reales.

Según la autora, las azoteas verdes no actúan como dispositivo de refrescamiento sino como capa de aislamiento impidiendo la entrada de calor. Por consiguiente, para su modelo, los parámetros más relevantes en el comportamiento de la cubierta son:

- Leaf Area Index (LAI), es el más importante porque determina la eficacia como dispositivo de sombreadamiento.
- Características geométricas del follaje.
- Densidad aparente del sustrato
- Profundidad del sustrato

-Contenido de humedad del sustrato, puesto que, a mayor humedad, mayor es su transmitancia térmica.

Sin embargo, el modelo sólo representa el potencial de enfriamiento de las cubiertas durante el verano, por lo que sólo sería parcialmente aplicable. No obstante, su formulación sirvió posteriormente para desarrollar modelos más completos (Sailor, D.J. 2008) (Kumar & Kaushik, 2005).

Por su parte, Theodosiu (2003) presenta una formulación matemática para reproducir el comportamiento real de las cubiertas vegetales, validada por experimentos reales. En su caso encuentra que los parámetros más relevantes en el comportamiento de su modelo son:

-Leaf Area Index (LAI), siendo éste el más importante porque determina la eficacia como dispositivo de sombreado, aunque concluye que la altura de la vegetación y el espesor del sustrato no son determinantes.

-La velocidad del viento y la humedad. Tienen gran impacto, puesto que actúan conjuntamente aumentando o disminuyendo la transmisión de energía a través de una mayor evapotranspiración. Su modelo analítico de elementos finitos es resuelto mediante la aplicación del método Gauss-Seidel, cubriendo los 21 puntos en los que divide las capas de sus probetas de validación. Esta complejidad, junto con la falta de acoplamiento a herramientas de simulación de edificios, desaconsejan la utilización de este procedimiento para nuestro estudio.

Posteriormente, Kumar y Kaushik (2005) construyen un modelo matemático validado a partir de una cubierta vegetal en la India. Después de realizar experimentos con su formulación, concluyen también que un mayor Leaf Area Index (LAI) reduce la temperatura en la capa vegetal y estabiliza las fluctuaciones de energía que penetran en el edificio. En su caso, el aparato matemático se desarrolla en Matlab usando la técnica de Transformada rápida de Fourier (FFT), pero tampoco se aplica directamente a software de modelado de edificios, lo que complica su utilización en nuestro cálculo.

Finalmente, Sailor (2008) propone un modelo matemático, basado parcialmente en Palomo del Barrio (1998) y Kumar y Kaushik (2005) pero incluyendo más variables por considerar que en estos modelos se simplifica excesivamente la influencia de la evapotranspiración y de los cambios de propiedades del sustrato en el tiempo. Para validar su formulación, el autor monitoriza dos cubiertas vegetales. Una de 4.000 m² en Chicago (Illinois) y otra en

Houston (Texas). Posteriormente implementa su procedimiento de cálculo en el software de simulación dinámica, EnergyPlus, elaborado por el Departamento de Energía de Estados Unidos, a través de una capa de material, llamado EcoRoof, que se comporta de forma similar a las cubiertas vegetales observadas en sus experimentos reales.

Gran número de autores (Zinzi & Agnoli, 2012), (Castleton H.F. Stovin, V. Beck, S.B.M. Davison, J.B. 2010), (La Roche & Berardi, 2014), (Olivieri et al., 2013), (Ascione et al., 2013), (Refahi, A. Talkhabi, H. 2015), (Pisello, A. Piselli, C. Cotana, F. 2015) han utilizado posteriormente este mismo método validándolo con resultados satisfactorios.

Aunque existen también otros software de simulación térmica dinámica que han sido utilizados por otros investigadores tales como TRNSYS (Sfakianaki, A. Pagalou, E. Pavlou, K. Santamouris, M. Assimakopoulos, M. 2009), ESP-r (Alcázar, S. Bass, B. 2005) o GREENROOF module v7.3 (de Munck, C. Lemonsu, A. Bouzouidja, R. Masson, V. Claverie, R. 2013), en esta investigación vamos a utilizar el modelo matemático propuesto por Sailor e implementado en el software EnergyPlus para evaluar el comportamiento térmico de las cubiertas experimentales, por ser el más ampliamente utilizado y haber sido validado para multitud de diferentes condiciones climáticas y tipológicas.

El motor de cálculo de Energy Plus permite realizar simulaciones energéticas horarias. La herramienta lleva a cabo un detallado análisis térmico y permite incorporar multitud de factores tales como: datos climáticos (temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa horaria), materiales de construcción, características de los sistemas de instalaciones, perfiles de uso (ocupación, iluminación, ventilación, mantenimiento de instalaciones, etc.). Además, la versión utilizada de Energy Plus, número 8.6.0, incorpora un modelo unidimensional validado de una cubierta vegetal introduciendo los parámetros de evapotranspiración de la vegetación, las propiedades térmicas del sustrato en función del tiempo (conductividad e inercia) y los intercambios de energía por radiación y convección. La herramienta permite la descripción pormenorizada de todos los componentes constructivos de la cubierta, ya que permite aportar la transmitancia térmica, refracción solar y emisividad de cada material (Sailor, DJ. 2008) (US Dept of Energy, 2015).

3.8 CÁLCULO DE EFICIENCIA HÍDRICA

La segunda de las variables de los experimentos necesarios para concluir esta investigación es la eficiencia hídrica de las distintas soluciones propuestas. Puesto que el desarrollo de la vegetación es fundamental para el correcto desempeño de las azoteas verdes, la cantidad de riego mínima para conseguirlo es un valor fundamental a la hora de determinar su sostenibilidad real.

Para ello, como se ha comentado previamente, se construyen 4 módulos experimentales que simulan los parámetros de una cubierta vegetal a escala real y se estudia su comportamiento a lo largo de diferentes períodos, tanto en verano como en invierno. Además, se divide el experimento en dos fases en las que se investigan diferentes especies vegetales autóctonas con el objetivo de seleccionar aquellas con mejores resultados para el clima de referencia.

3.9 SET-UP EXPERIMENTO REAL. MATERIALES Y MÉTODOS.

En la primavera de 2017, se procedió a montar un total de 4 módulos experimentales de 60x80 cm. (0,48 m² cada uno), que tratan de reproducir las condiciones de las cubiertas vegetales empleadas en los edificios. Dos de ellos contaban con una altura total de 20 cm. y albergarían los experimentos con 7,5 cm. de espesor de sustrato, destinados para rehabilitación de edificios. Los otros dos, con 30 cm. de altura total, acogerían las cubiertas de 15 cm. de espesor, optimizadas para obras de nueva planta.¹⁰



Figura 3.01. Imágenes del proceso inicial de instalación de las láminas drenantes en los módulos experimentales. Fuente: autor.

¹⁰ Para detalles completos de la instalación del experimento ver Anexo IV.



Figura 3.02. Imágenes del proceso inicial de instalación del sustrato y la vegetación en los módulos experimentales. Fuente: autor.

El objetivo de los experimentos será trabajar en torno a dos variables:

A - Profundidad del sustrato: Dos módulos de 7,5 cm. y otros dos de 15 cm. de profundidad.

B - Riego: Dos de ellos, uno de cada espesor, llevarán distintos patrones de riego en función de la época del año y del período de estudio.

Los recipientes que servirán de probetas, de la empresa local Palet Plastic, se situaron en el lado sur del Laboratorio de Materiales de la Universidad Católica San Antonio de Murcia (UCAM), a $37^{\circ}59'29.5''N$ y $1^{\circ}11'07.9''O$ de latitud y longitud.

El tipo, composición del sustrato y las capas técnicas de la cubierta serán seleccionados en el Capítulo 6 en función de los resultados que otros autores han demostrado previamente, con el fin de limitar el número de variables y centrar el experimento en el ahorro energético teórico y la supervivencia de las distintas especies vegetales bajo un alto estrés hídrico.

Como se ha indicado previamente, las especies vegetales se seleccionarán por un sistema doble, según la literatura botánica y por observación en la naturaleza, proceso también desarrollado en el Capítulo 6 y los Anexos 1 y 2.

Para obtener los mayores datos posibles, se utilizan 8 ejemplares de 6 especies autóctonas distintas, lo que hace un total de 48 plantas. Por tanto, en cada módulo se ubican 2 ejemplares de cada especie, con un total de 12 plantas por módulo.

Los experimentos se desarrollan en varias fases distintas que abarcan desde junio de 2017 hasta el inicio de 2019 incluyendo períodos con riego y épocas de sequía prolongada con el fin de evaluar la resistencia de la vegetación a las condiciones extremas de las cubiertas en el Mediterráneo.

3.10 PROPUESTA DE FÓRMULA DE HIDRO-EFICIENCIA

Una vez realizados los estudios de demandas energéticas e hídricas se propone establecer una fórmula comparativa, que permita evaluar eficazmente la eficiencia energética global de las distintas composiciones de cubiertas. El objetivo será traducir a valores porcentuales la relación de cuanta energía, en kWh/m²a, se consume para aportar agua de riego a la cubierta, por cada kWh/m²a de energía que se ahorra en climatizar los edificios que las albergan.

$$\text{Clasificación de cubiertas por eficiencia} = \frac{\text{Uso de agua}}{\text{Ahorro energético}}$$

Posteriormente, se establecerán cuáles son los criterios o el rango para descartar determinadas tipologías y se elaborará un catálogo de soluciones idóneas o compatibles con el clima cálido y semi-árido del Mediterráneo, según los datos obtenidos en la fase experimental y aquellos encontrados en la literatura científica.

IV – CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA

IV – CARACTERIZACIÓN DEL CLIMA

4.1 INTRODUCCIÓN

Si bien los experimentos realizados durante esta investigación se han llevado a cabo en una localización específica, en el Mediterráneo occidental, concretamente en la ciudad de Murcia, es de esperar que las conclusiones que se deriven de este estudio puedan ser aplicadas a otras zonas climáticas con determinadas similitudes. El objetivo de este Capítulo es en primer lugar, contextualizar las condiciones climáticas de los experimentos realizados y por otro lado, demostrar que si los experimentos llevados a cabo en esta investigación son viables en un clima considerablemente árido como es el de Murcia, sus resultados en zonas climáticas similares, pero algo más moderadas, debieran ser mejores, o muy similares en el peor de los casos.

Se hace, por tanto, necesaria una caracterización del clima de Murcia y su comparación con estas zonas más o menos homogéneas. Sin embargo, tal y como recoge Granados (2006) está claro que en función de la escala de interpretación que se escoja y de los criterios o filtros aplicados, esta definición de zonas con climas homogéneos será muy variable. Dentro de estas escalas existen varios factores físicos y geográficos que pueden alterar estas clasificaciones.

El análisis de estas escalas se puede realizar bien aislando cada una de las variables climáticas o bien de forma conjunta utilizando clasificaciones climáticas ya establecidas. Estas clasificaciones tienen normalmente una correspondencia con la distribución de la vegetación, es decir que cada tipo de clima suele estar dominado por una cierta zona vegetal, también llamada eco-región (Belda, M. Holtanová, E. Halenka, T. Kalvová, J. 2014).

Puesto que los factores que determinarán la supervivencia de una especie vegetal en una zona concreta son: temperaturas medias (máximas y mínimas), temperaturas máximas y mínimas absolutas, niveles de radiación incidente, viento y cantidad y distribución de lluvias anuales (Getter & Rowe, 2006), las clasificaciones climáticas que se han tenido en cuenta en este trabajo son las que se desarrollan a continuación.

4.2 CLASIFICACIÓN DE KÖPPEN Y SUS VARIANTES

La primera de estas clasificaciones climáticas cuantitativas fue inicialmente enunciada en 1900 y perfeccionada en 1936 y se debe a Wladimir Köppen, especialista en fisiología botánica, que observó que las plantas son indicadores de muchos elementos climáticos (Kottek, M. Grieser, J. Beck, C. Rudolf, B. Rubel, F. 2006). A pesar de que desde ese momento se han desarrollado otras muchas clasificaciones diferentes, aquellas basadas en el enfoque inicial de Köppen y sus sucesivas modificaciones, Köppen-Geiger o Köppen-Trewartha, son aún las más utilizadas (Kottek et al., 2006) (Peel, M. C. Finlayson, B. L. McMahon, T. A. 2007), y esto se debe, según (Trewartha, G. Horn, L. 1980) a que estas sistematizaciones son cuantitativas y se basan en valores numéricos para definir los límites de cada región climática.

Según Köppen W. y Geiger, R. (1936) los climas son definidos por los valores de temperaturas medias anuales y mensuales y por las precipitaciones y su estacionalidad. De esta forma, Köppen tiene en cuenta que la disponibilidad de agua para la vegetación, no sólo depende de la cantidad de precipitación, sino también de la intensidad de evaporación que provoca grandes pérdidas de humedad en plantas y suelos. Concluye, por tanto, que una cantidad determinada de lluvia caída en una zona cálida, o concentrada en una estación calurosa donde la evaporación es mayor, será menos efectiva para la vegetación que la misma cantidad en un clima más frío o en una época menos calurosa (Trewartha & Horn, 1980).

De hecho, puesto que el origen de su sistema de división climática está basado en el comportamiento observado en la vegetación autóctona, muchas de sus categorías se apoyan en los límites geográficos de algunas formas vegetales (Granados, H. 2006) (Trewartha & Horn, 1980).

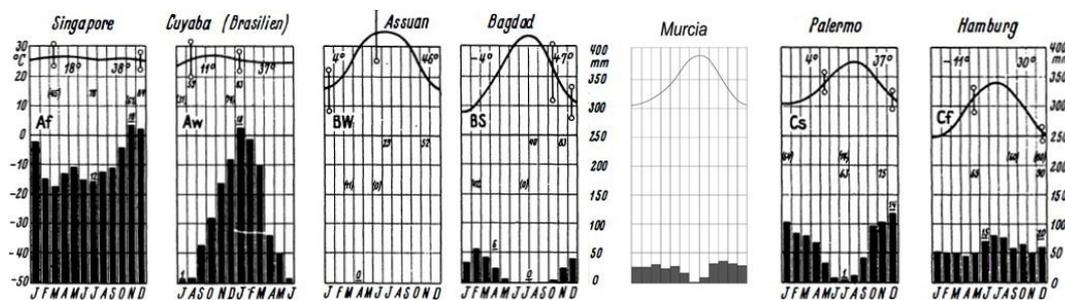


Figura 4.01. Gráficas climáticas originales de Köppen (1936) para diferentes localizaciones y su comparación con la ciudad de Murcia. Fuente: Köppen (1936) y elaboración propia para la ciudad de Murcia.

Existen cinco principales categorías climáticas en que se divide la clasificación original de Köppen-Geiger: Climas áridos (B), climas húmedos (A=tropical, C=templado, D=continental) y climas polares (E) (Köppen & Geiger, 1936). En algunos casos las divisiones entre zonas se llevan a cabo por medio de valores de temperatura y en otros casos, a través de las precipitaciones y su estación predominante. Es por este motivo que existe una cierta superposición o transversalidad de algunas variables. Por ejemplo, el clima B se extiende entre zonas de temperatura similar a las categorías A, C y D, pero teniendo como particularidad sus bajas precipitaciones.

Además de estas categorías principales, letras adicionales permiten subdividir más específicamente los rasgos de temperatura, estacionalidad y precipitaciones (Köppen & Geiger, 1936). Así por ejemplo aparece la distinción entre BW, clima seco desértico y BS, clima seco de estepa. De la misma forma, BSh, clima seco de estepa cálida, se diferencia del clima seco de estepa fría, BSk por la tercera letra de la nomenclatura.

Para la zona de la cuenca Mediterránea que nos ocupa, los climas más característicos son aquellos clasificados como BSh-BSk, ambos climas secos de estepa y como Csa, templado de verano seco y cálido, también llamado Clima Mediterráneo de verano cálido, aunque como veremos a continuación, sus límites son complejos de dibujar con exactitud.

CLIMA	Subclase	Descripción	Subtipo	Descripción	Criterio
A		Tropical			No (B) & T _{frío} ≥ 18
B	W	Seco Desierto (árido)			Pa < P _{umbral}
	S	Estepa (semi-árido)			Pa < 50% P _{umbral} Pa ≥ 50% P _{umbral}
C		Templado			No (B) & T _{cal} > 10 & 0 < T _{frío} < 18 °C
	s	Verano seco			P _{vseco} < 40 & P _{vseco} < P _{húm} /3
	w	Invierno seco			P _{iseco} < P _{vhúm} /10
	f	Sin estación seca			No (Cs) ni (Cw)
			a	Verano cálido	T _{cal} ≥ 22
		b	Verano templado	No (a) & T _{mes10} ≥ 4	
		c	Verano frío	No (a ó b) & 1 ≤ T _{mes10} < 4	
D		Frío			No (B) & T _{cal} > 10 & T _{frío} ≤ 0
E		Polar			No (B) & T _{cal} ≤ 10

Tabla 4.01. Tipos de clima y sus criterios de clasificación según Köppen-Geiger (1936). Elaboración propia a partir de (Köppen & Geiger, 1936) y (Peel et al., 2007).

4.2.1 Clima B - Seco - Árido y Semiárido

La característica principal del clima seco es que la evaporación potencial de la superficie del terreno y la vegetación es superior a la precipitación media anual (Köppen & Geiger, 1936). Por tanto, los contornos de los climas secos no dependen exclusivamente de la cantidad de precipitación, sino que el ratio de evapotranspiración también es relevante, para lo que se han utilizado diversas fórmulas que incluyen la temperatura como método simplificado de estimación (Trewartha & Horn, 1980).

En general, según Köppen, dentro de los climas secos se pueden distinguir tres situaciones diferentes según la estacionalidad de las lluvias: concentradas en invierno, concentradas en verano o repartidas durante todo el año. Las distintas ecuaciones empleadas para calcular el Umbral de Aridez, recogen esta variación, teniendo en cuenta que según estos autores, la precipitación acumulada durante los meses de invierno es más efectiva para la vegetación, puesto que la evapotranspiración es menor y el agua remanente para las plantas es mayor (Köppen & Geiger, 1936).

En concreto, las regiones climáticas BS, semiáridas o de estepa, están caracterizadas porque la precipitación es inferior a la evaporación y se encuentra entre el 50 y 100% de la evaporación potencial, mientras que en el clima desértico, BW, la precipitación es inferior al 50% de la evaporación potencial. Estas dos zonas climáticas son las de mayor extensión en los continentes, ocupando el 26% de la superficie total de la Tierra, de las que un 14% son estepa y un 12% desierto (Trewartha & Horn, 1980).

Si además de cumplir estos criterios, la temperatura media anual es superior a 18 °C, estaríamos hablando, según Köppen, de un clima de estepa cálida, BSh, que es nombrado también en muchas ocasiones como *mediterráneo seco*, pues se encuentra generalmente como transición entre el clima Csa, comúnmente llamado *mediterráneo* y el BW o *desértico* (Trewartha & Horn, 1980).

Ejemplos de localizaciones geográficas enmarcadas dentro de la categoría BSh serían: Murcia, Alicante, Almería (límite con BWh y BSk), Tenerife, Amán (Jordania), Marrakesh (Marruecos), Trípoli (Libia), El Pireo (Grecia), Nicosia (Chipre) Monterrey (México), San Diego (USA) o zonas de Australia y Chile.

En el límite de la división entre BSh y BSk, por contar con una temperatura media anual ligeramente inferior a los 18º, se encuentran también ciudades con características similares como Elche, Valencia, Damasco (Siria), Tarento (Italia) o Long Beach en Los Ángeles (USA).

4.2.2 Clima Csa – Templado de verano seco y cálido (Mediterráneo)

Generalmente, adyacente a estos climas BS se encuentran zonas climáticas definidas como Csa, que tienen como características principales: una mayor precipitación anual que las estepas pero con una marcada sequedad en verano y temperaturas templadas durante todo el año, particularmente cálidas en verano.

Aunque según la clasificación original de Köppen, todos los climas Cs combinados (a, b y c) apenas ocupan un 1.7% de la superficie terrestre (Trewartha, G. Horn, L. 1980), es un clima muy notorio, puesto que se extiende por áreas muy pobladas como la cuenca del Mediterráneo, zonas de California, Australia y Chile, siendo Barcelona, Palma de Mallorca, Málaga, Sevilla, Madrid, Lisboa (Portugal), Marsella (Francia), Nápoles, Palermo y Roma (Italia), Split

(Croacia), Tel Aviv (Israel), Beirut (Líbano), Tijuana (México), Perth y Adelaida (Australia) o Los Ángeles (USA) ejemplos del clima Csa en concreto.

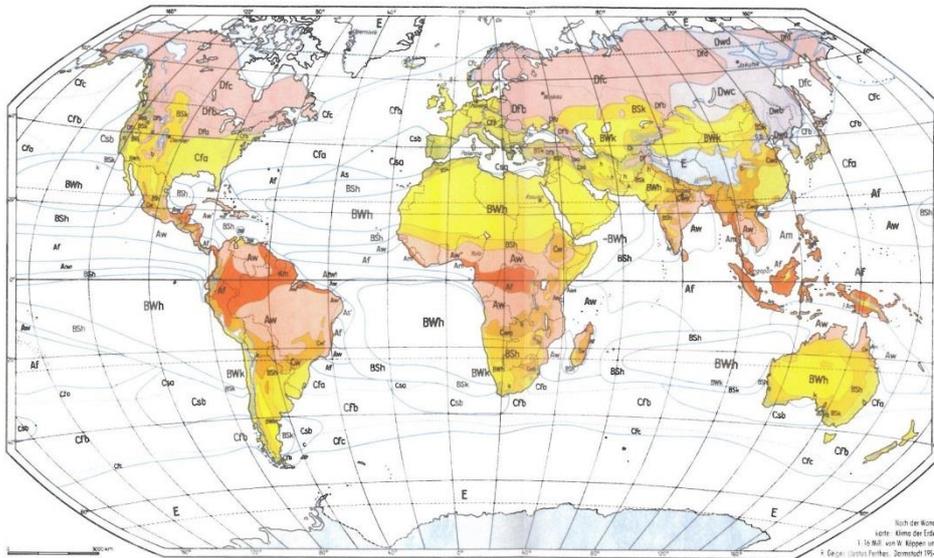


Figura 4.02. Mapa climático mundial de Köppen-Geiger. Fuente: Köppen, W. Geiger, R. (1954).

No obstante, aunque ampliamente adoptado, este sistema de Köppen, también cuenta con algunas limitaciones. La primera de ellas es claramente la variabilidad del clima, tanto de año en año como a lo largo de las décadas.

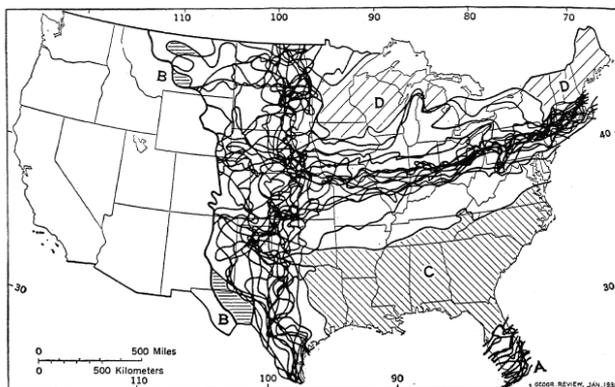


Figura 4.03. Cambios anuales del límite de Clima B según el sistema de Köppen. Sombreados aparecen los climas que no han cambiado de posición ningún año. Fuente: Trewartha, G. Horn, L. 1980.

Prueba de ello es que desde su aparición en 1900, se han trazado múltiples mapas basados en sus mismos parámetros y cada uno de ellos ha resultado diferente en función del período climático contemplado. Además, en el muy corto plazo, la clasificación es poco estable, existiendo muchas zonas, especialmente acusado en Europa y Asia, que cambian de posición y nomenclatura de año en año, demostrando que existen algunas regiones intermedias para las que la división no es suficientemente ajustada (Peel et al., 2007) como se puede apreciar en las figuras XXX a YYY.

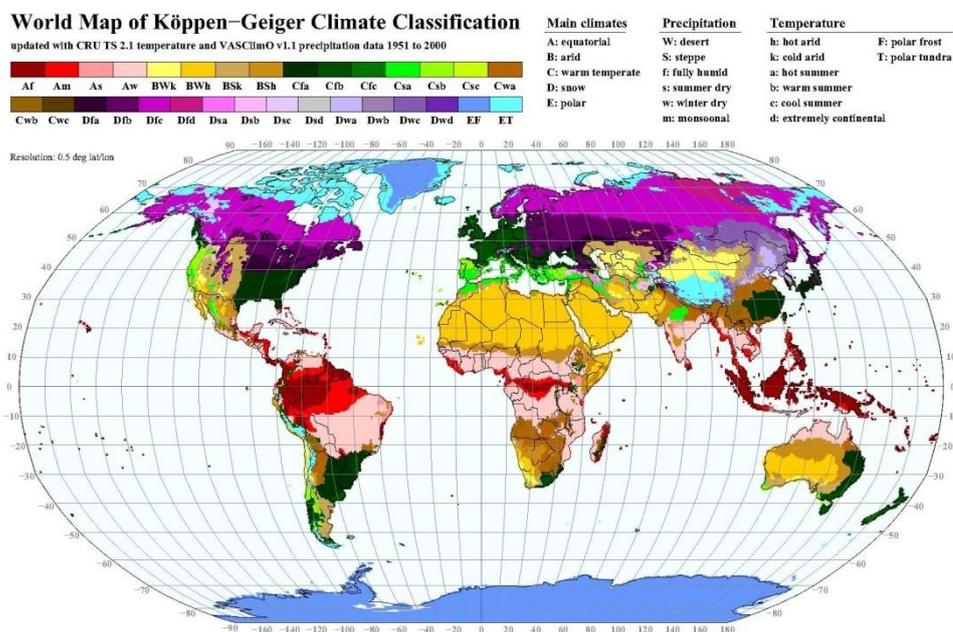


Figura 4.04. Mapa Digital Mundial de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con medias mensuales CRU TS 2.1 de temperatura y VASCLIM v1.1 de precipitación en el período 1951 a 2000 en un grid regular de latitud/longitud. Publicado por Kottek et al. 2006.

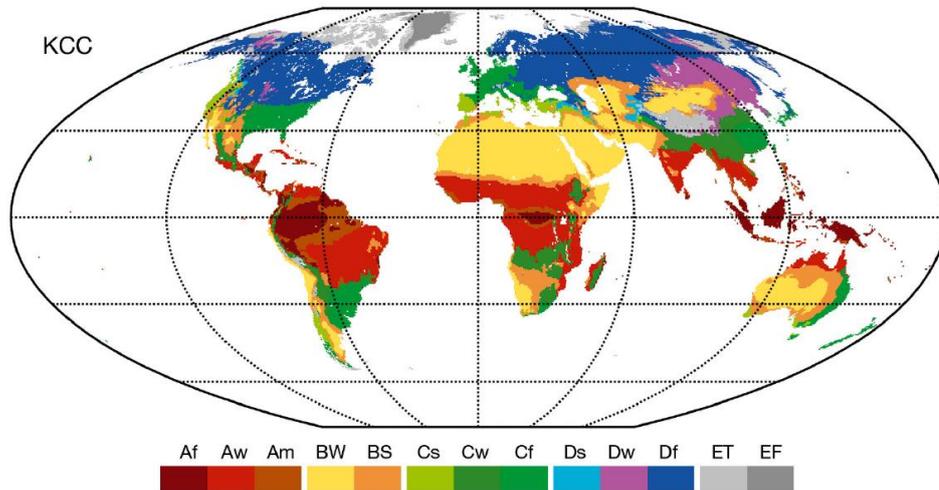


Figura 4.05. Mapa Digital Mundial de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de CRU TS 3.10 en el período 1961 a 1990 en un grid regular de latitud/longitud de 0.5°. Publicado por Belda, M. Holtanová, E. Halenka, T. Kalvová, J. 2014.

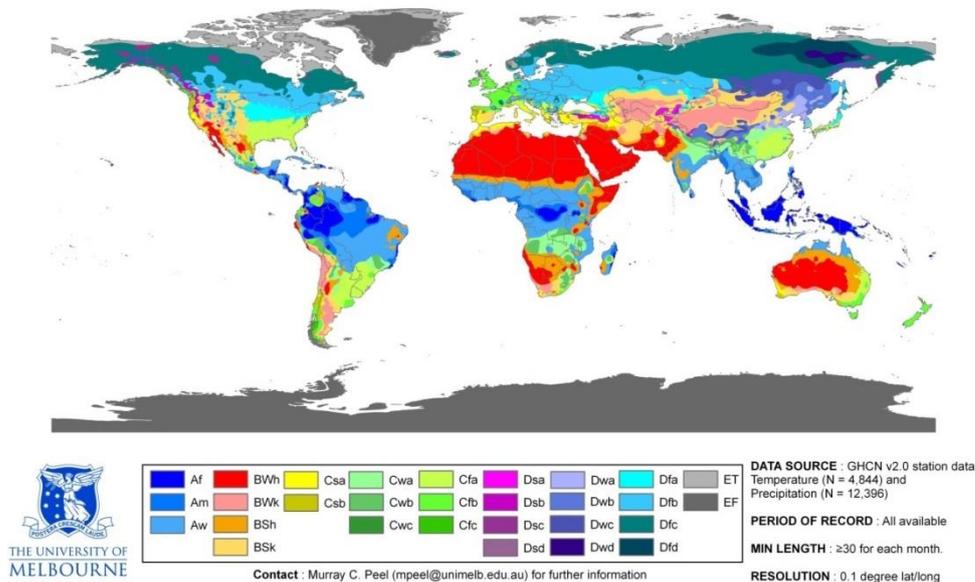


Fig. 4.06. Mapa Digital Mundial de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de temperatura y precipitación GHCN v2.0 (Global Historical Climatology Network) en todo el período 1800-2006. Publicado por Peel et al., 2007.

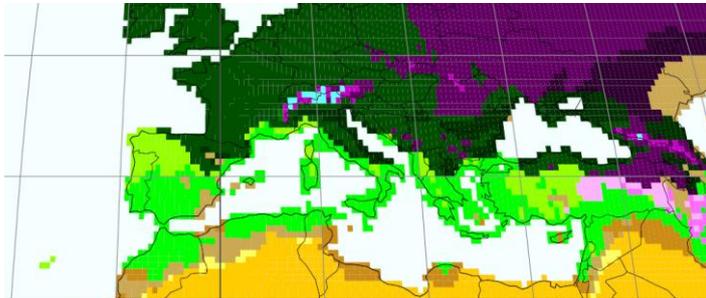


Fig. 4.07. Mapa Digital de Europa de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con medias mensuales CRU TS 2.1 de temperatura y VASClmO v1.1 de precipitación en el período 1951 a 2000 en un grid regular de latitud/longitud. Publicado por Kottek et al. 2006.

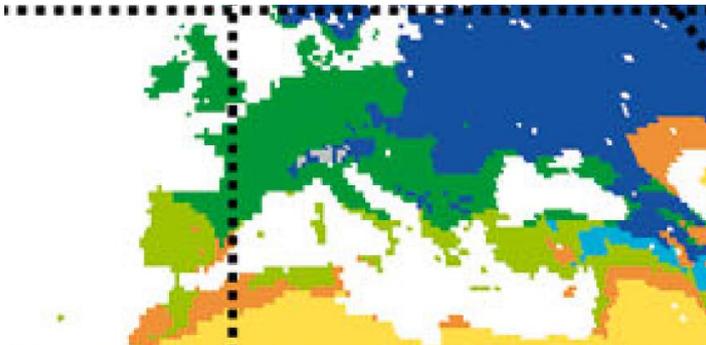


Fig. 4.08. Mapa Digital de Europa de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de CRU TS 3.10 en el período 1961 a 1990 en un grid regular de latitud/longitud de 0.5°. Publicado por Belda, M. Holtanová, E. Halenka, T. Kalvová, J. 2014.

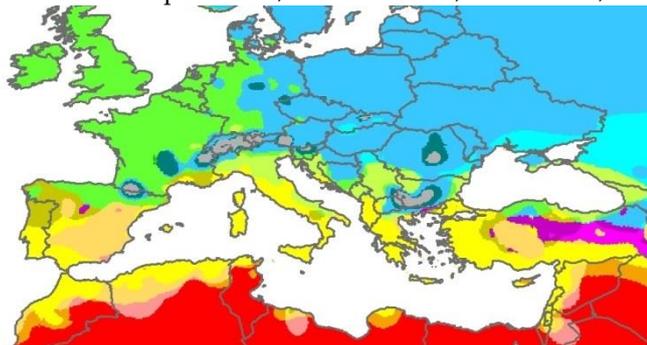


Fig. 4.09. Mapa Digital de Europa de Clasificación Climática Köppen-Geiger actualizado con datos de temperatura y precipitación GHCN v2.0 (Global Historical Climatology Network) en todo el período 1800-2006. Publicado por Peel et al., 2007.

Más incertidumbre, si cabe, genera la predicción de las futuras líneas divisorias, en un clima que está en evolución constante, por lo que los datos más actualizados a medio y largo plazo son más relevantes que nunca tal y como demostraron (Beck, H. Zimmermann, N. McVicar, T. Vergopolan, N. Berg, A. Wood, E. 2018) en su proyección climática para el período 2070-2100. Aunque los autores predicen cambios sustanciales en las regiones climáticas y revelan una tendencia a la desertización (climática), advierten también que es posible que los cambios climáticos no se correspondiesen exactamente con cambios en los biomas, puesto que factores no tenidos en cuenta en la clasificación de Köppen como los mayores niveles de concentración de CO₂, podrían afectar la relación entre vegetación y tipos climáticos.

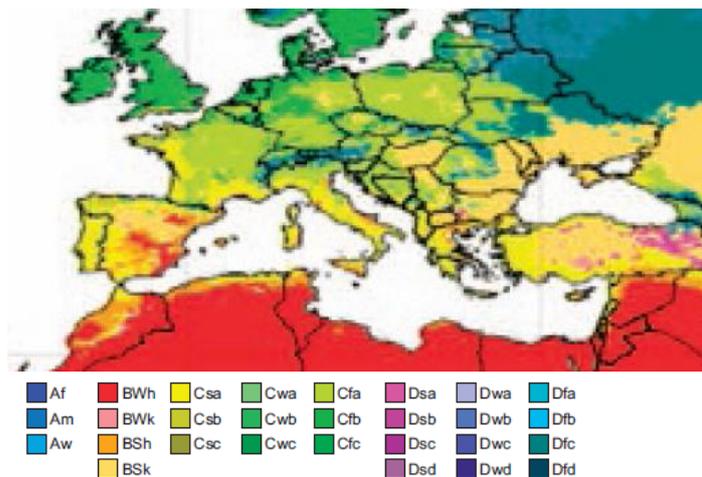


Fig. 4.10. 2070-2100 Mapa de Köppen-Geiger basado en la composición de las proyecciones climáticas de los 32 modelos de CMIP5. Fuente: Beck, H. Zimmermann, N. McVicar, T. Vergopolan, N. Berg, A. Wood, E. 2018.

4.3 MODIFICACIONES DEL MODELO KÖPPEN

Como se ha comentado previamente, a la clasificación original de Köppen y su sistematización de 1936, Köppen-Geiger, se han seguido sucesivas modificaciones que pretenden redefinir los grupos climáticos, especialmente para climas secos y/o templados, de forma más ajustada a la zonificación vegetal (Trewartha & Horn, 1980).

Las principales diferencias radican en la distinta división entre climas áridos (B) y húmedos (A, C y D), lo que se materializa en ecuaciones matemáticas distintas para cada caso. En concreto, para nuestra zona climática de estudio, estas diferentes fórmulas conllevan divisiones espaciales ligeramente distintas que matizan en una u otra dirección los climas de varias localizaciones Mediterráneas (Köppen & Geiger, 1936), (Trewartha, G. Horn, L. 1980), (Peel et al., 2007), (Kottek et al., 2006).

Ciudad	Tª Med anual	Tª Med Max mensual	Tª Med Min mensual	Precip. Anual	Precip. Mín.	Precip. Máx.	Köppen-Geiger			Köppen-Trewartha			Griffiths	
	°C	°C	°C	mm/año	mm/mes	mm/mes	P umbral mm/a	Aridez % (0% más seco)	clase	P umbral mm/a	Aridez % (0% más seco)	clase	R=Umbral aridez mm/a	Déficit agua %
Almería	17,9	25,3	11,8	228	1 (Jul)	31(Oct)	358	64%	BSk	280,00	81%	BW	321,1	-25%
Sta Cruz Tenerife	20,9	25,2	17,4	266	0 (Jul)	56(Dic)	418	64%	BSh	310,00	86%	BW	348,1	-24%
Murcia	18,1	26,3	10,3	293	2 (Jul)	48(Oct)	502	58%	BSh	282,00	104%	BS	322,9	-9%
Cartagena	18,2	26	11	296	3 (Jul)	49(Oct)	504	59%	BSh	283,00	105%	BS	323,8	-9%
Long Beach (USA)	17,7	22,7	13,6	308	0 (Jul)	70 (Ene)	354	87%	BSk	278,00	111%	BS	319,3	-4%
Nicosia (CHP)	18,8	28	10,1	329	1 (Jul)	71(Dic)	376	88%	BSh	289,00	114%	BS	329,2	0%
Elche	17,8	26	10,5	318	4 (Jul)	60(Oct)	496	64%	BSk	279,00	114%	BS	320,2	-1%
Alicante	18,1	26,1	10,9	344	4 (Jul)	48(Oct)	502	69%	BSh	282,00	122%	BS	322,9	7%
Los Ángeles (USA)	18,2	23,6	13,9	396	0 (Jul)	91 (Feb)	364	109%	Csa	283,00	140%	BS	323,8	22%
Atenas (GR)	18,1	27,9	9,5	397	5 (Jul)	68(Dic)	362	110%	Csa	282,00	141%	BS	322,9	23%
Zaragoza	14,7	24	6,1	357	17 (Jul)	47(May)	434	82%	BSk	248,00	144%	BS	292,3	22%
Albacete	14,2	24	5,9	384	10 (Jul)	47(Abr)	424	91%	BSk	243,00	158%	BS	287,8	33%
Valencia	17,4	24,9	11,1	445	10 (Jul)	85(Oct)	488	91%	BSk	275,00	162%	BS	316,6	41%
Tel Aviv (ISR)	20,2	27	13,5	562	0 (Jul)	154(Dic)	404	139%	Csa	303,00	185%	BS	341,8	64%
Madrid	13,7	24	5	450	11 (Jul)	58(Nov)	414	109%	Csa	238,00	189%	BS	283,3	59%
Sevilla	18,6	27,8	10,3	576	1 (Jul)	87(Nov)	372	155%	Csa	287,00	201%	Cs	327,4	76%
Palermo (ITA)	18,4	26,2	12,1	605	4 (Jul)	90(Dic)	368	164%	Csa	285,00	212%	Cs	325,6	86%
Tarragona	16,1	23,6	9,2	560	17 (Jul)	75(Oct)	462	121%	Csa	262,00	214%	Cs	304,9	84%
Barcelona	16,5	24,1	9,8	612	25 (Jul)	93(Oct)	470	130%	Csa	266,00	230%	Cs	308,5	98%
Londres (GB)	11,1	18,7	4,9	621	39 (Feb)	61(Nov)	362	172%	Cfb	212,00	293%	Cf	259,9	139%
Trieste (ITA)	14,3	23,6	5,6	1067	69 (Feb)	116(Nov)	426	250%	Cfa	244,00	437%	Cf	288,7	270%
Munich (AL)	8	17	-1,8	930	49 (Feb)	124 (Jun)	300	310%	Dfb	181,00	514%	Df	232	301%
DESÉRTICO								70% Prec (OCT-MAR)						
EXTREMADAMENTE SECO								70% Prec (ABR-SEPT)						
MUY SECO								Precip repartida						
SECO														
MODERADAMENTE HÚMEDO														
HÚMEDO														

Tabla 4.02. Resumen de datos climáticos de 22 ciudades de referencia y sus distintas clasificaciones. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AEMET en <https://datosclima.es/Aemet2013> y <https://es.climate-data.org>.

Se hace evidente, por tanto que aunque constituyen una herramienta muy útil, las clasificaciones climáticas no son escalas fijas sino elementos de aproximación a la definición del clima.

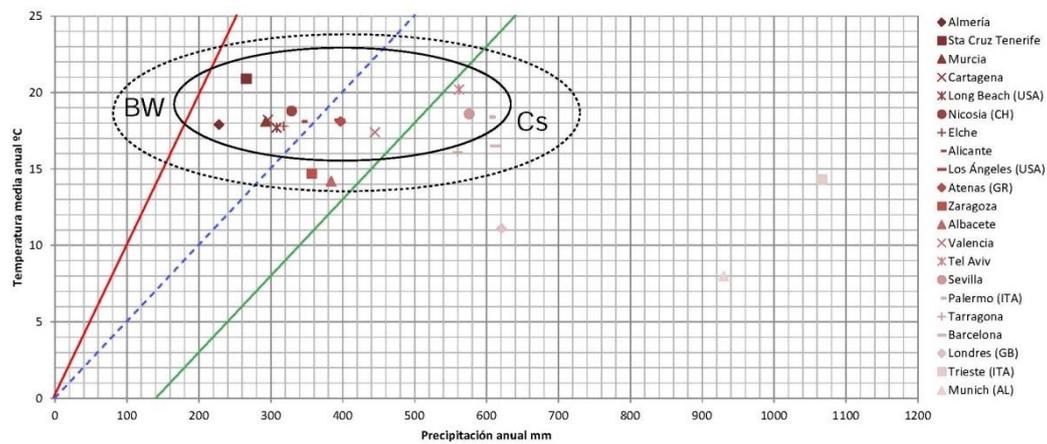


Figura 4.11. Clasificación climática de 22 ciudades de referencia según Köppen. Las líneas de color representan las ecuaciones que generan la división climática. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AEMET en <https://datosclima.es/Aemet2013> y <https://es.climate-data.org>.

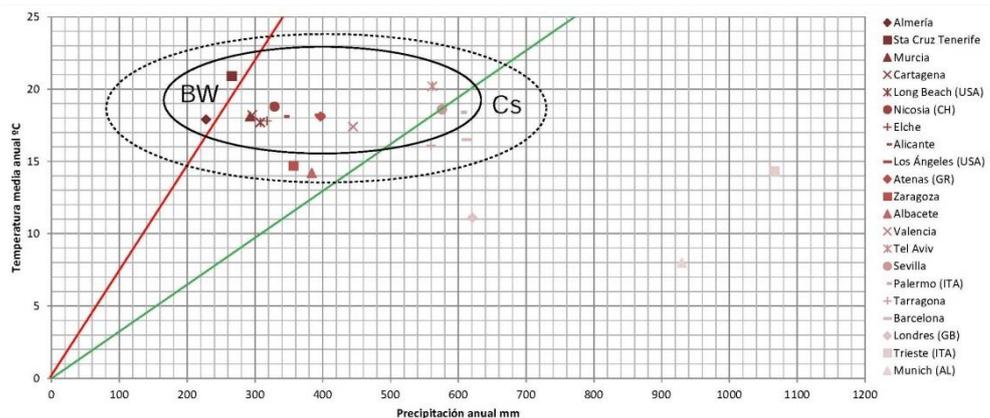


Figura 4.12. Clasificación climática de 22 ciudades de referencia según Trewartha. Las líneas de color representan las ecuaciones que generan la división climática. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de AEMET en <https://datosclima.es/Aemet2013> y <https://es.climate-data.org>.

Por otro lado, aparecen también clasificaciones completamente nuevas como la de Budyko (Budyko, M. 1958). Todas ellas tienen en común que cuestionan la definición de Umbral de Aridez o Precipitación Umbral de Köppen y Köppen-Geiger.

4.4 CLASIFICACIÓN DE BUDYKO

Aunque muy generalista, es interesante mencionar también este enfoque, puesto que autores posteriores utilizarán conceptos similares. Se trata de una clasificación basada en el balance de energía y las precipitaciones (Budyko, M. 1958). Como parámetro de definición climática utiliza el Índice Radiativo de Aridez o sequedad (I_d), que calcula con la fórmula:

$$I_d = R_n / (L \cdot r)$$

dónde: R_n es la radiación neta disponible para la evaporación de una superficie húmeda, L es el calor latente de evaporación y r es la precipitación anual media.

Según Budyko, esta clasificación climática basada en la combinación de ambos parámetros, energía y aridez, se corresponde más acertadamente con la zonificación vegetal que existe en los continentes (Budyko, M. 1958).

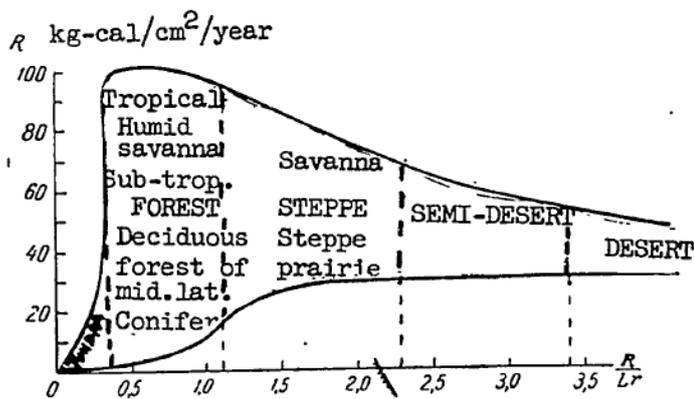


Figura 4.13. Zonificación botánica en función de I_d . Fuente: Budyko, M. 1958.

Este índice I_d es inferior a 1 en los climas húmedos, y superior en los climas secos. Budyko obtiene, siguiendo este parámetro, cinco tipos climáticos.

- Desierto I_d superior a 3
- Semidesierto I_d entre 2 y 3
- Estepa I_d entre 1 y 2
- Bosque I_d entre 0,33 y 1
- Tundra I_d inferior a 0,33

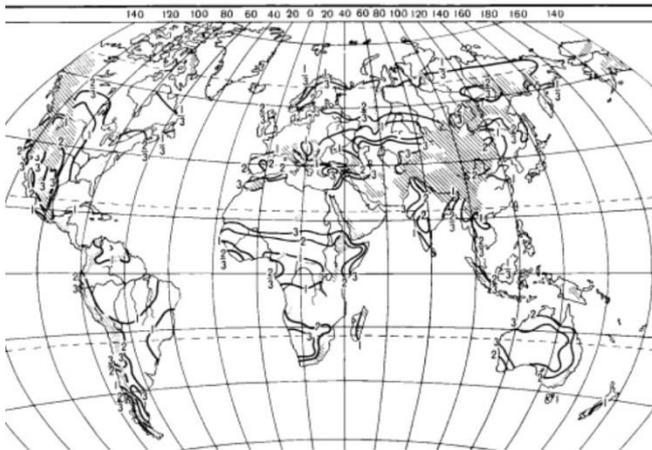


Figura 4.14. Mapa según el Índice radiativo de aridez *Id*. Fuente: Budyko, M. 1958.

4.5 ZONIFICACIONES VEGETALES

Por otro lado, aunque todas las clasificaciones climáticas que se han tenido en cuenta, a la hora de definir posibles áreas de aplicabilidad de este estudio, están teóricamente basadas y pretenden representar la zonificación vegetal, existen otros condicionantes que éstas no consideran y que podrían resultar relevantes.

El primero de ellos, es la diferencia entre la vegetación existente y la vegetación potencial (Ramankutty, N. Foley, J.A. 1999), que se define como aquella que existiría en una determinada localización si se excluyera la acción transformadora del ser humano en el territorio. Estos autores, en un estudio en Norte América, encontraron que sólo hasta 1992, más de 3 millones de kilómetros cuadrados de sabanas y bosques habían sido reemplazados por superficies de monocultivo, por lo que la diversidad biológica actual no se correspondería en absoluto con las zonificaciones climáticas.

En segundo lugar, retroalimentando el proceso derivado de estos cambios antrópicos, se encuentra la introducción de especies alóctonas, con una definición muy variable, que compiten con la vegetación local y pueden alterar su composición (Butler, C. Butler, E, Orians, C. 2012).

Adicionalmente deberían considerarse las diferentes condiciones edáficas de los suelos, tales como PH, contenido de nutrientes, composición química, granulometría, etc. (Bouma, E. 2005) que podrían negar la supervivencia a

determinados tipos de vegetación en zonas climáticas teóricamente adaptadas a ese bioma y por tanto alterar la percepción de las clasificaciones climáticas basadas en la existencia de un marco vegetal a nivel de suelo que no sería relevante en una cubierta vegetal con un sustrato artificial.

Para establecer cuál sería la zonificación de la vegetación potencial de una región, según su clima, se utilizan complejos modelos informáticos, basados en los datos climáticos conocidos y a partir de ellos se predice la división el territorio en distintos biomas (Ramankutty & Foley, 1999). Es interesante observar a partir de estos mapas como la división vegetal de un área como la península ibérica no coincidiría demasiado con su subdivisión climática según los modelos expuestos anteriormente.

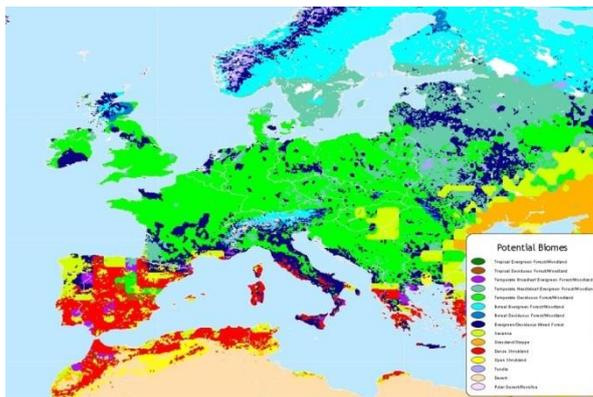


Figura 4.15. Mapa de Vegetación Potencial de Europa a partir de los datos de Ramankutty, N. Foley, J.A. 1999. Fuente: Center for Sustainability and the Global Environment, Nelson Institute for Environmental Studies, University of Wisconsin-Madison.

4.6 DATOS CLIMÁTICOS HISTÓRICOS DE LA CIUDAD DE MURCIA

Una vez se han revisado las zonas de aplicabilidad potencial de las conclusiones de este estudio, se pretende realizar un resumen de los datos climáticos reales obtenidos durante el período de experimentos.

La ciudad de Murcia se encuentra en el Sureste de España, a poco más de 30 km. de la costa Mediterránea. Su clima se caracteriza por temperaturas cálidas durante casi todo el año con inviernos suaves y veranos muy calurosos debido a

la predominancia de las masas de aire cálido tropical, modificadas en su recorrido por el Mediterráneo (Conesa, C. 2006). El mes más caluroso del año con un promedio de 27,6 °C es agosto. El mes más frío del año con 10,6 °C de promedio es enero¹¹.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DH	DD	I
Enero	10.6	16.6	4.7	27	65	3.8	2.3	8.0	189
Febrero	12.2	18.4	5.9	27	63	3.6	1.2	7.1	190
Marzo	14.3	20.9	7.7	30	59	3.3	0.3	6.5	223
Abril	16.5	23.3	9.7	25	53	3.6	0.0	5.8	256
Mayo	20.0	26.6	13.3	28	52	3.9	0.0	5.8	289
Junio	24.2	31.0	17.4	18	49	2.0	0.0	10.9	323
Julio	27.2	34.0	20.3	3	50	0.6	0.0	16.1	353
Agosto	27.6	34.2	20.9	8	54	1.0	0.0	12.5	316
Septiembre	24.2	30.4	18.0	32	59	3.0	0.0	6.7	239
Octubre	19.8	25.6	13.9	36	64	3.7	0.0	5.3	217
Noviembre	14.6	20.3	8.9	32	65	4.1	0.2	7.1	186
Diciembre	11.5	17.2	5.8	29	68	3.9	1.5	7.0	172
Año	18.6	24.9	12.3	297	58	36.5	5.5	99.2	2967

Leyenda

T	Temperatura media mensual/anual (°C)
TM	Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
Tm	Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
R	Precipitación mensual/anual media (mm)
H	Humedad relativa media (%)
DR	Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
DH	Número medio mensual/anual de días de helada
DD	Número medio mensual/anual de días despejados
I	Número medio mensual/anual de horas de sol

Tabla 4.03. Valores climatológicos normales de la ciudad de Murcia. Datos obtenidos: www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=7178I&k=mur entre 1984 y 2010. Altitud (m): 61. Latitud: 38° 0' 7" N - Longitud: 1° 10' 15" O.

¹¹ Ligeras discrepancias existen con los datos facilitados por Climate.org en base a datos del período 1982-2012: <http://es.climate-data.org/location/3214/> donde se recogen temperaturas medias de 26,3 °C en agosto y 10,3 °C en enero, con una precipitación media anual de 293mm.

Las precipitaciones son escasas y habitualmente torrenciales con una media de 297 mm/m²a en la ciudad y menos de 400 mm/m²a para la Región en su conjunto. Sin embargo, las medias de los últimos cinco años son ligeramente inferiores, con tan sólo 251,2¹² mm/m²a para la capital, con episodios puntuales de hasta 94,2 mm/m² en un solo día.

Como caracteriza a todo el clima del Mediterráneo, la precipitación en verano es particularmente baja, siendo julio el mes más seco, con 3 mm., mientras que la media en octubre, el mes más húmedo, es de 36 mm.

A estos datos se añaden unos índices de radiación solar muy elevados, con medias anuales de 4.566 Wh por metro cuadrado y día (Vera, F. García, J R. García, Z. 2008), lo que conduce a valores de evapotranspiración anuales muy altos, de entre 680 mm/m² y 1.315 mm/m² según la vegetación de referencia (Conesa, C. 2006).

Estos datos sitúan Murcia en el clima BSh de la escala Köppen-Geiger, BS en la variante de Köppen-Trewartha y Clima 2 (semidesierto) en la clasificación de Budyko, aunque como se ha discutido en los apartados anteriores, la cercanía con los climas adyacentes es muy alta y basada en parámetros muy abruptos de separación sin transición alguna entre ellos.

Sin embargo, como se ha observado anteriormente, la variabilidad del clima en el corto plazo es muy grande, por lo que las medias históricas pueden sufrir muchas variaciones en períodos cortos como son de año en año. Por tanto, los datos específicos del período en el que se llevaron a cabo los experimentos con vegetación en probetas se han recogido y se expondrán en el Capítulo VII, junto con los resultados de los experimentos, con el fin de observar si existieran discrepancias relevantes respecto a la tendencia climática histórica.

¹² Datos recabados de AEMET: <https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitastad2013.php>

**V – HUELLA ENERGÉTICA
DEL AGUA**

V – HUELLA ENERGÉTICA DEL AGUA

5.1 PROBLEMÁTICA DEL USO DEL AGUA EN REGIONES SEMIÁRIDAS

El agua es un elemento necesario para la vida y para el desarrollo de las sociedades humanas. El acceso al agua potable es un derecho humano fundamental tal y como reconoció la Asamblea General de las Naciones Unidas en su resolución del 28 de julio del año 2010 (Naciones Unidas, 2010).

Sin embargo, el agua disponible para su utilización humana es un bien muy escaso. De toda el agua existente en la tierra, sólo el 2,53% es agua dulce, de la que aproximadamente un 2% se encuentra atrapada en los casquetes polares. El resto es principalmente agua subterránea y atmosférica y sólo una pequeña parte, el 0,014% se encuentra fácilmente accesible en lagos, ríos, humedales, etc. (Shiklomanov, I. 1993).

A nivel mundial, desde la década de 1980, el uso de agua dulce ha sufrido incrementos del 1% anual, motivado por una combinación de factores tales como el aumento exponencial de la población, el mayor desarrollo económico y social y un cambio en los patrones de consumo. Este aumento ha sido particularmente importante en los países en vías de desarrollo y economías emergentes (WWAP, 2014).

Actualmente, el mayor consumidor de agua a nivel mundial es el sector de la agricultura y ganadería, con casi el 70%, mientras que la industria, incluyendo la generadora de energía, representa el 19% y el consumo doméstico, equivale únicamente al 12%. Sin embargo, se estima que el consumo global se verá incrementado en un 55%, debido fundamentalmente a un crecimiento del 400% de la demanda de agua de la industria manufacturera, un 140% para la generación de electricidad y un 130% en el uso de los hogares (WWAP, 2014).

Como consecuencia de este incremento de demanda, aumentará considerablemente la presión sobre los ecosistemas naturales y el estrés físico hídrico será también mayor, particularmente si se intensifican los efectos del cambio climático (Bates, B. Kundzewicz, Z. Wu, S. Palutikof P. 2008).

Si bien en la actualidad se estima que 2.000 millones de personas habitan en regiones con un alto estrés hídrico, para el año 2050 se prevé que el 40% de la población mundial padezca una grave escasez de agua, debido a la sobreexplotación de acuíferos, la disminución de las reservas de agua subterránea y al deterioro de humedales, que reducirán la capacidad de los ecosistemas para purificar agua (WWAP, 2019) (Bates et al., 2008).

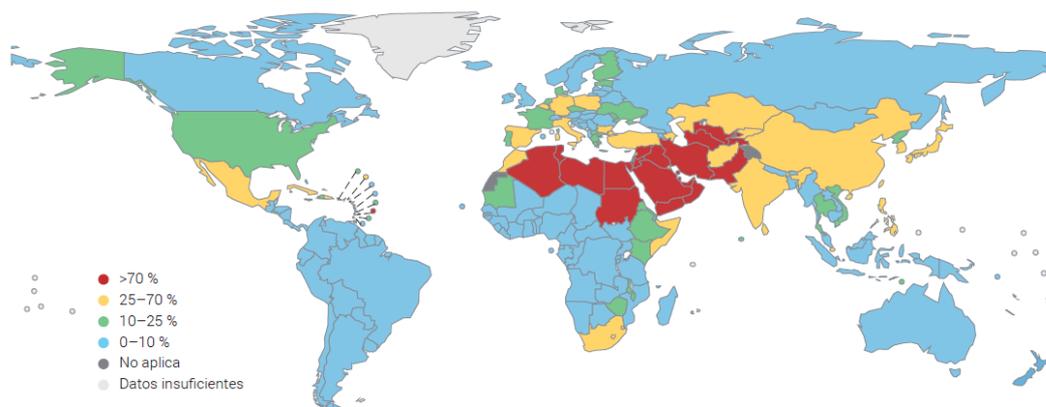


Figura 5.01. Mapa mundial de Estrés Hídrico, entendido como la proporción del total de agua dulce extraída anualmente por todos los sectores principales, respecto a la cantidad total de recursos renovables de agua dulce, expresada como porcentaje. Fuente: WWAP, 2019.

5.2. CÓMO SE EVALÚA EL USO DEL AGUA. HUELLA HÍDRICA.

5.2.1 Agua para sector primario y agua uso doméstico

Como se ha señalado anteriormente, el ahorro y la gestión eficaz de los recursos hídricos, no sólo tiene sentido en aquellos lugares con mayor escasez, sino de forma generalizada. El consumo de agua de las redes de abastecimiento y su posterior vertido a los sistemas de evacuación tiene también una implicación energética que refuerza la necesidad de un cambio de modelo a escala global.

Aunque numéricamente podamos observar que el consumo de agua doméstica representa una parte muy pequeña de la demanda global en comparación con otros usos como el agrícola, es bien cierto, que es uno de los que más impacto directo causan en el medio ambiente, tanto por su impacto hídrico

en los flujos naturales, como por la gran cantidad de energía que es necesario emplear para su captación, transporte, potabilización y posterior depuración.

Esta relación agua-energía es un binomio que posee muchas vertientes. Por un lado, el ciclo del agua para su utilización en las ciudades consume grandes cantidades de energía. Por otro, la producción de energía, prácticamente en todas sus modalidades, requiere de importantes volúmenes de agua. Constituyen por tanto un círculo vicioso. A mayor consumo de agua potable, mayor gasto energético para su tratamiento y transporte, que a su vez produce un mayor uso de agua en los procesos de generación eléctrica.

Como consecuencia de estos problemas, se hace necesario un nuevo enfoque que, desde la sostenibilidad, permita conseguir una mayor racionalización del uso del agua potable y la generación del menor impacto posible en el medio ambiente. Una de las respuestas a la problemática del uso desmedido del agua en las sociedades desarrolladas, es el concepto del cálculo de la Huella Hídrica.

5.2.2 Concepto de la Huella Hídrica

Desarrollada en 2002 por el investigador Arjen Y. Hoekstra, la idea de la Huella Hídrica es de cierta forma equivalente a la de Huella Ecológica que se desarrolló en la década de 1990. Mientras que la Huella Ecológica trata de medir la superficie necesaria en hectáreas para el sustento y producción de bienes de consumo de una determinada población, la Huella Hídrica denota la cantidad de agua necesaria para el mismo fin, expresada en metros cúbicos (Hoekstra, A.Y. 2009).

Los ciudadanos de los países más desarrollados son, con diferencia, los que generan una mayor Huella Hídrica en el planeta, por vía de su consumo directo de agua potable, pero fundamentalmente por el consumo de bienes y servicios que llevan asociados un alto gasto de agua en su producción y transporte. Países como Estados Unidos, con 2.480 m³/per/año o España con aproximadamente 2.325 m³/per/año (Elorrieta, J.I. 2009), multiplican por varias veces el gasto de agua de otros como China, con 700 m³/per/año, aunque a medida que las sociedades se van desarrollando plenamente, su Huella se tiende a parecer más a los primeros (Hoekstra, A.Y. 2009).

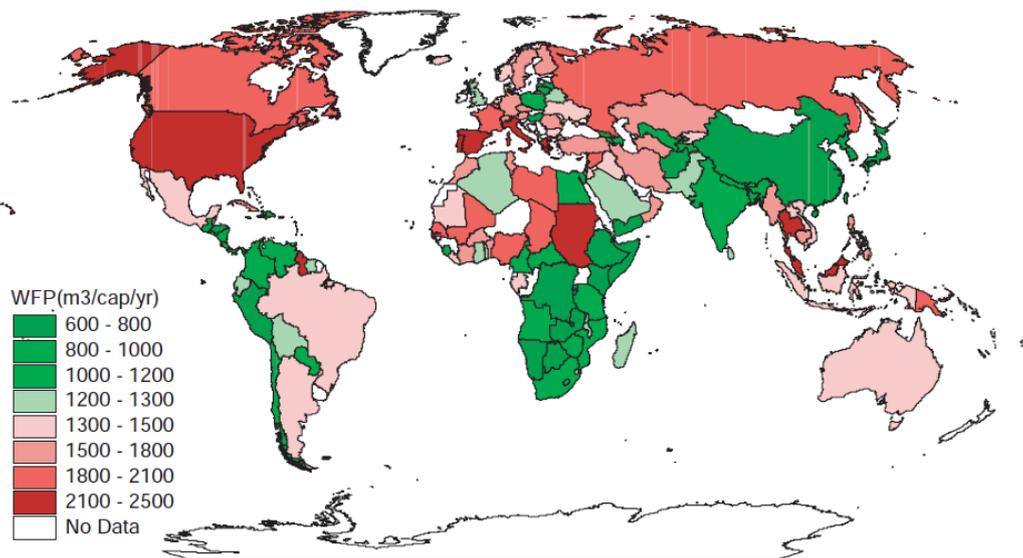


Figura 5.02. Mapa de la Huella Hídrica media per cápita ($\text{m}^3/\text{per}/\text{año}$). En tonos verde, aquellos países con una media inferior a la media mundial. En tonos rojos, países que superan la media global. Fuente: Hoekstra, A.Y. 2007.

De la Huella Hídrica española, $2.325 \text{ m}^3/\text{per}/\text{año}$, cabe destacar que la agricultura y ganadería contribuyen con un 80% (tanto interna como de importación), la industria el 15% (producción propia e importación) y el consumo doméstico el 5%, es decir, lo que equivaldría a unos 116 m^3 por persona y año (Elorrieta, J.I. 2009).

A modo de ejemplo, podríamos calcular el consumo de agua per cápita que supondría una cubierta vegetal con un aporte de riego medio-bajo, $300 \text{ litros}/\text{m}^2$ a lo largo del año. Si tomamos el ejemplo de una vivienda unifamiliar aislada, de 100 m^2 de superficie en una sola planta, en la que vive una familia de 5 personas, el consumo anual de agua para riego de la cubierta (suponiendo que no existiera reutilización in-situ de aguas pluviales o residuales) sería de unos 30 m^3 , es decir unos $6 \text{ m}^3/\text{per}/\text{año}$. Si se tratase de un edificio del mismo tamaño, pero con uso oficinas, el impacto per cápita se reduciría a la mitad, mientras que si la azotea vegetal se instalase en un edificio de vivienda plurifamiliar de seis plantas, el aumento de la Huella Hídrica de cada habitante sería únicamente de 1 m^3 al año.

De estos datos, podemos concluir que el gasto de agua que pudieran generar las cubiertas verdes en la edificación, supondría un porcentaje mínimo

del consumo total del agua virtual que se incluye en la Huella Hídrica de los individuos, representando entre el 0.002 y el 0.0004% del total de agua empleada.

Sin embargo, a nivel energético, este pequeño gasto sí que podría suponer una diferencia fundamental en el balance energético global de los edificios, al tratarse, excepto en los casos de reutilización in-situ, de un agua muy intensiva en energía.

5.3 HUELLA ENERGÉTICA DEL CICLO DEL AGUA

5.3.1 Consumo de energía para el suministro de agua urbana

Como se ha señalado previamente, el ciclo del agua para su utilización en las ciudades es responsable del consumo de grandes cantidades de energía, tanto para su abastecimiento como para su posterior eliminación y depuración antes de retornar a la naturaleza.

Uno de los factores determinantes en el gasto energético en la potabilización del agua es la finalidad de su uso. El agua de boca requiere habitualmente un tratamiento muy intensivo mientras que aguas para riego, limpieza de calles e incluso algunos usos dentro de los edificios aceptan calidades de agua inferiores (WWAP, 2014). Evidentemente, en el posible riego de las cubiertas verdes se debería dar prioridad a este tipo de agua o incluso la reutilización de aguas pluviales o grises generadas in situ por su bajo factor energético, aunque esto no siempre es posible.

Por tanto, se hace necesario remarcar que los procesos de captación, transporte, tratamiento y distribución del agua para usos urbanos son los que conllevan un mayor consumo energético, aunque este varía en función de la procedencia de las aguas, su calidad o su distancia al punto de uso (Hardy, L. Garrido, A. Juana, L. 2012) (WWAP, 2014).

A este respecto se han realizado en los últimos años diversos estudios en distintas localizaciones geográficas, aunque pocos de ellos evalúan de manera detallada el consumo global de energía en el ciclo del agua urbana (Hardy et al., 2012).

De aquellas publicaciones que sí especifican estos distintos gastos de forma pormenorizada, se tomarán únicamente aquellos datos relativos a la fase de suministro, puesto que se estima que el posible agua de riego para una cubierta verde sería completamente consumida por la vegetación y no existiría un excedente que pasara a las redes de alcantarillado, con lo que la energía destinada a recoger y depurar estas aguas no sería en principio un dato relevante.

Es más, se podría ahondar aún más en el balance energético del ciclo del agua y considerar que puesto que las cubiertas verdes son capaces de absorber parte del agua de lluvia que de otra forma se uniría con las aguas residuales de los edificios (asumiendo que no existe una red separativa), redundan en un ahorro energético en las fases de saneamiento y depuración. Sin embargo, por la complejidad de su cálculo y la variabilidad de los episodios de lluvias, para nuestro estudio obviaremos este escenario y no consideraremos ningún aporte de energía favorable de este fenómeno.

5.3.2 Captación y transporte

En cuanto a la captación del agua dulce y su transporte, el gasto energético se ve marcado por la fuente de procedencia. El agua se toma desde el medio natural para posteriormente trasladarla a las plantas de tratamiento, algo que se denomina abastecimiento en alta (Ferrer Polo, J. Aguado García, D. Barat Baviera, R. Serralta Sevilla, J. Lapuente Ojeda, E. 2016).

Por un lado, el agua superficial de ríos, lagos, canales, embalses, etc. si se encuentra a distancias cercanas es normalmente la menos intensiva en energía. Por otro lado, el agua subterránea procedente de acuíferos, aunque generalmente requiere menos tratamiento para su potabilización que la superficial, conlleva un mayor gasto energético para su bombeo. Por último, las aguas salobres procedentes de marismas o del mar, aunque puedan ser muy cercanas al punto de uso, son las que mayor consumo de energía requerirán para su tratamiento (WWAP, 2014).

Por ejemplo, en Estados Unidos, Webber, M.E. (2008), estimó los gastos de energía necesarios para la captación de agua dulce, en función de su distinta procedencia. Sin embargo, este estudio no tiene en cuenta factores como la

distancia a la que el agua es transportada ni el nivel de eficiencia, que es muy variable de una localización a otra (WWAP, 2014).

INTENSIDAD ENERGÉTICA CAPTACIÓN	KWh/ m ³
Abastecimiento de lago o río	0.37
Abastecimiento de acuífero	0.48
Depuración agua residual	0.62 - 0.87
Desalación	2.58 - 8.5

Tabla 5.01. Requerimientos energéticos por cada m³ de agua potable en función de la procedencia. Fuente: Elaboración propia a partir de Webber, M.E. 2008.

En el caso del transporte del agua dulce hasta las distintas plantas potabilizadoras, el factor más relevante es el funcionamiento hidráulico, es decir, si se realiza por gravedad o por conducciones a presión (Ferrer Polo et al., 2016).

INTENSIDAD ENERGÉTICA TRANSPORTE	Suministro local KWh/m ³	Trasvase KWh/m ³
Rango inferior	0.023	0.502
Valor medio	0.029	0.792
Rango superior	0.087	1.399

Tabla 5.02. Requerimientos energéticos por cada m³ de agua potable en función de su transporte. Fuente: Elaboración propia a partir de Cooley, H. Wilkinson, R. 2012.

5.3.3 Potabilización

Precisamente, es en la etapa de tratamiento para conseguir la calidad deseada, donde se genera un mayor consumo de energía. Dependerá en primer lugar de la calidad inicial de las aguas y en menor medida de las necesidades en el punto de utilización, puesto que el agua para riego o limpieza no requiere los mismos estándares que la de consumo humano. Si las aguas proceden de fuentes de buena calidad y con poca contaminación, su coste energético puede ser prácticamente nulo. En cambio, si el agua es procedente por ejemplo del mar, el gasto energético en desalación será muy elevado (Hardy et al., 2012).

Los tratamientos convencionales suelen incluir procesos tales como el desbaste, decantación, filtración y desinfección. En la energía considerada para

esta etapa, se suele incluir la impulsión del agua tratada, que en algunas ocasiones supone el mayor consumo energético del proceso. Los tipos de tratamiento son muy variables, desde una ligera desinfección, en los casos de aguas limpias de manantiales o pozos, hasta sistemas más complejos que incluyen la eliminación de compuestos nocivos para la salud o que permiten la utilización de fuentes no potables como es el mar (Ferrer Polo et al., 2016).

De hecho, durante los últimos veinte años, el rápido crecimiento en desalación de aguas en todo el mundo y también notablemente en España, ha producido un incremento muy significativo en la Huella Energética del agua. Aunque se trata de una opción apropiada en determinadas situaciones y las mejoras tecnológicas han aumentado su eficiencia energética desde los 10 kWh/m³ que consumían las plantas de los años 80 hasta los 2,5 kWh/m³ de las más actuales, su uso debe ser aún objeto de estudios pormenorizados por su alto consumo energético y el impacto que genera el aumento de salinidad en los mares (WWAP, 2014).

El gasto energético de los procesos de desalinización dependen en primer lugar de la tecnología empleada y en segundo de factores como la temperatura y salinidad del agua (WWAP, 2014) o de la presencia de equipos de recuperación de energía (Ferrer Polo et al., 2016).

En la actualidad las plantas desaladoras de membrana mediante ósmosis inversa están mucho más extendidas, por ser más eficientes, que otras tecnologías como la destilación o la congelación (IDAE, 2010). En España, las instalaciones más modernas, tienen un consumo de algo más de 3,5 kWh/m³, aunque se estima que la optimización de la tecnología actual, especialmente en el diseño de membranas de mayor flujo y menor presión, permita alcanzar valores de 2,5 kWh/m³ (IDAE, 2010).

SALINIDAD AGUA BRUTA mg/l	INTENSIDAD ENERGÉTICA kWh/m ³
1,000 - 3,000	0.97 - 1.11
3,000 - 5,000	1.11 - 1.40
5,000 - 7,000	1.40 - 1.69
7,000 - 10,000	1.69 - 2.19

Tabla 5.03. Requerimiento energético de potabilización por m³ de agua en función de su salinidad. Fuente: Elaboración propia a partir de Cooley, H. Wilkinson, R. 2012.

A nivel mundial, como dato medio, Cooley, H. y Wilkinson, R. (2012) publicaron datos de 15 instalaciones de desalinización mediante ósmosis inversa posteriores al año 2005, cuyo consumo energético medio es de 4,0 kWh/m³, con un rango de variación que oscilaba entre 3,7 y 4,2 kWh/m³.

5.3.4 Distribución urbana

Posteriormente a su tratamiento, el agua debe ser distribuida hasta sus puntos de utilización, proceso que también consume energía dependiendo de las diferencias topográficas del recorrido, de la escala de las instalaciones y la antigüedad de las infraestructuras. No se incluyen en esta categoría los gastos energéticos que se pudieran generar pasado el punto de suministro de la red general, tales como bombeos en comunidades de propietarios o las conexiones desde la acometida del edificio hasta cada una de las viviendas (Ferrer Polo et al., 2016).

5.3.5 Ciclo total

Si tenemos en cuenta todas estas etapas que comprende la distribución de agua potable hasta el punto de utilización en las ciudades, encontramos algunos estudios que sí evalúan todos los procesos de forma global y que permiten obtener datos absolutos comparables entre distintas localizaciones.

Particularmente destacado es el estudio llevado a cabo por la Comisión de Energía del Estado de California, que reproducimos a continuación por su similitud geográfica y climática con España, donde se estima que el 20% de toda la energía que se consume está dedicada al suministro y tratamiento del agua potable (WWAP, 2014).

CICLO URBANO DEL AGUA ESTADO DE CALIFORNIA	INTENSIDAD ENERGÉTICA, kWh/m ³	
	Inferior	Superior
Captación y transporte	0.00	3.70
Potabilización	0.03	4.22
Distribución urbana	0.18	0.32
Alcantarillado y depuración	0.29	1.21
Vertido	0.00	0.11
Reutilización y distribución	0.11	0.32

Tabla 5.04. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en California. Fuente: elaboración propia basada en Klein G., Krebs M., Hall V., O'Brien T. Blevins B. 2005.

La alta variabilidad entre valores inferiores y superiores de este estudio se debe en parte a un fenómeno que también ocurre en España, la escasez de recursos naturales próximos a muchas ciudades y zonas urbanas (Ferrer Polo et al., 2016), especialmente en el Sur del Estado. Este hecho, implica que también en el Estado de California sea necesario recurrir a trasvases o desalación de agua del mar, con el consiguiente gasto energético que conllevan (Klein G., Krebs M., Hall V., O'Brien T. Blevins B. 2005).

CICLO URBANO DEL AGUA NORTE DE CALIFORNIA	kWh/m ³
Captación y transporte	0.04
Potabilización	0.03
Distribución	0.32
Depuración	0.66
Total	1.04

Tabla 5.05. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en California. Fuente: elaboración propia basada en Klein G., Krebs M., Hall V., O'Brien T. Blevins B. 2005.

5.4 INTENSIDAD ENERGÉTICA DEL CICLO HÍDRICO EN ESPAÑA

En el caso específico de España, la intensidad energética de las etapas del ciclo de utilización del agua varía en función de las características particulares de cada zona.

Mientras que en la ciudad de Madrid se calculó un total de 0,57 kWh/m³ para el proceso completo (Ferrer Polo et al., 2016), en el municipio de Valencia, se estimó en 1,24 kWh/m³ (Murgui M. Cabrera E. Pardo M. Cabrera E. Jr. 2009), en incluso en otras zonas como la Costa Brava, los valores podrían alcanzar los 5,41 kWh/m³, debido al uso de desalación de agua del mar (Sala L. 2007).

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA ESPAÑA	Rango de intensidad energética (KWh/m3)		
	Mín.	Medio	Máx.
Abastecimiento y transporte de agua	0.00	0.24	2.10
Tratamiento de agua	0.11	0.57	4.67
Distribución de agua	0.12	0.21	0.22
Tratamiento de aguas residuales	0.41	0.53	0.61
Tratamiento y distribución de agua reciclada	0.32	0.59	0.85
Vertido de aguas residuales	0.00	0.05	0.11

Tabla 5.06. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en España. Fuente: elaboración propia basada en Hardy, L. Garrido, A. Juana, L. 2012.

INTENSIDAD ENERGÉTICA MEDIA CICLO URBANO DEL AGUA ESPAÑA	KWh/m3
Suministro y potabilización	1.08
Distribución	0.17
Alcantarillado	0.05
Depuración	0.51
Reutilización (incluye distribución)	0.59
Global	1.71

Tabla 5.07. Intensidad energética Media en las distintas fases del ciclo Urbano del agua en España. Fuente: elaboración propia basada en Hardy, L. Garrido, A. Juana, L. 2012.

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA - VALENCIA	kWh/m ³
Captación, bombeo, transporte, potabilización y distribución	0.13 - 0.31
Rebombeo	0.16
Drenaje	0.05
Depuración	0.01 - 0.54
Emisario	0.05
Transporte aguas reutilizadas	0 - 0.23
Tratamientos terciarios	0.2

Tabla 5.08. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en el municipio de Valencia. Fuente: elaboración propia basada en Murgui M. Cabrera E. Pardo M. Cabrera E. Jr. 2009.

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA ALMERÍA	Captación, potabilización y distribución kWh/m ³
Captaciones subterráneas	0.94
Desalación	4.50
Transferencia externa (trasvases)	2.24
Global	1.48

Tabla 5.09. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en el municipio de Almería. Fuente: elaboración propia basada en Martínez F.J. 2011.

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA MUNICIPIOS COSTA BRAVA	Captación/ extracción, potabilización y distribución kWh/m ³
Agua superficial - transporte a cortas distancias (<10 km)	0.0002 - 0.37
Agua superficial - transporte a largas distancias (>10 km)	0.15 - 1.74
Agua subterránea - acuíferos locales	0.37 - 0.75
Agua subterránea - acuíferos lejanos	0.60 - 1.32
Desalación (incluye distribución)	4.94 - 5.41

Tabla 5.10. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en municipios de la Costa Brava. Fuente: elaboración propia basada en Sala L. 2007.

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA MADRID	Consumo específico (KWh/m3)
Aducción	0.15
Potabilización	0.06
Distribución	0.002
Alcantarillado	0.01
Depuración	0.33
Regeneración	0.01
TOTAL	0.57

Tabla 5.11. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en el municipio de Madrid. Fuente: elaboración propia basada en Ferrer Polo, J. Aguado García, D. Barat Baviera, R. Serralta Sevilla, J. Lapuente Ojeda, E. 2016.

5.5 HUELLA ENERGÉTICA DEL AGUA EN LA REGIÓN DE MURCIA

En el caso de la presente investigación, tomaremos como referencia los últimos datos publicados por las Administraciones Públicas de la Región para el cálculo de los consumos energéticos generados para suministrar la posible agua de riego a una cubierta verde en esta localización geográfica.

A continuación se expresan los consumos energéticos de los diferentes procesos en el ciclo urbano actual del agua, calculados por el Ente Público del Agua de la Región de Murcia:

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA MURCIA	Consumo específico (KWh/m3)
Captación de Aguas superficiales	1.1
Desalación	4.2
Distribución: impulsiones y bombeos	0.8
MEDIA PRODUCCIÓN + DISTRIBUCIÓN	2.83
Transporte de Aguas residuales	1.3
Depuración de Aguas residuales (trat. convencional)	1.8
MEDIA TOTAL	5,93

Tabla 5.12. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en la Región de Murcia. Fuente: elaboración propia basada en Garrido, A. 2007.

Por tanto, puesto que como hemos comprobado, la intensidad energética del agua varía muy significativamente según la localización, para la comparación de nuestros resultados con estudios de otras zonas del Mediterráneo o del mundo, utilizaremos como referencia los distintos datos citados en los apartados previos, en función de la ubicación de los ensayos referidos en esas publicaciones.

**VI –
CUBIERTA VERDE ÓPTIMA:
CRITERIOS DE SELECCIÓN**

VI - CUBIERTA VERDE ÓPTIMA: CRITERIOS DE SELECCIÓN

6.1 INTRODUCCIÓN.

Las cubiertas ecológicas o azoteas verdes están compuestas generalmente por un conjunto de capas que se añaden a la estructura de último forjado de un edificio con la intención de reconstruir la huella vegetal destruida con la implantación del edificio (Getter & Rowe, 2006).

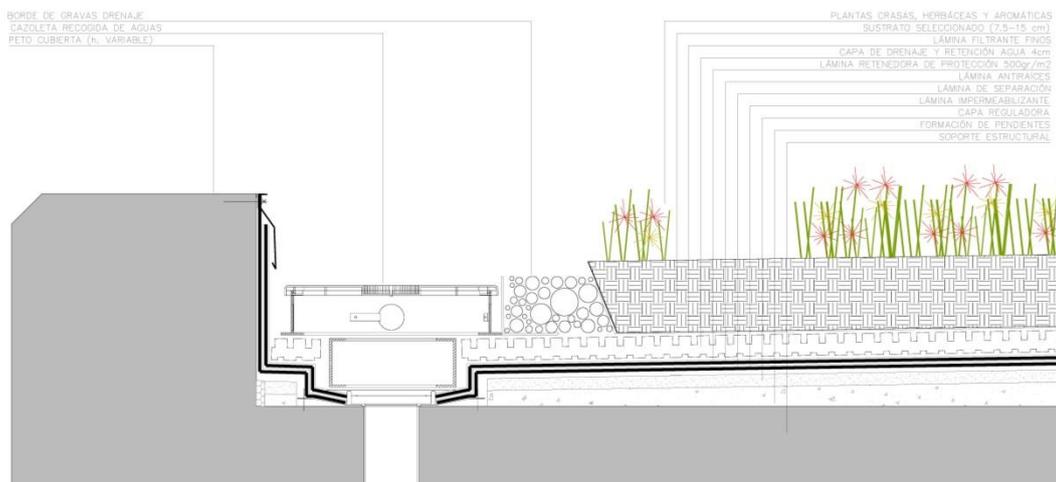


Figura 6.01. Sección transversal de una cubierta vegetal tipo. Fuente: elaboración propia.

Consisten normalmente en una membrana impermeabilizante, sobre la que se coloca una lámina anti raíces que la protege de posibles daños causados por las plantas. En ocasiones aparece a continuación una lámina de retención de agua, que alarga la disponibilidad de humedad para la vegetación. Sobre ésta se encuentran las capas más importantes de la cubierta. El drenaje, que elimina el exceso de agua presente por lluvia o por riego y que puede constar bien de material suelto o de elementos prefabricados diseñados con este fin. Por último el medio de crecimiento o sustrato donde la vegetación se puede desarrollar. Habitualmente existe también una lámina geotextil entre drenaje y sustrato para evitar la pérdida de finos y la saturación de la red de evacuación e incluso una

segunda capa de retención de agua sobre el geotextil para incrementar el almacenamiento de humedad de la cubierta a largo plazo (Getter & Rowe, 2006) (Nardini, A. Andri, S. Crasso, M. 2012) (Savi, T. Marin, M. Boldrin, D. Incerti, G. Andri, S. Nardini, A. 2014).

6.2 CLASIFICACIÓN ACTUAL DE CUBIERTAS VEGETALES

6.2.1. Cubiertas verdes Intensivas

Las cubiertas vegetales intensivas se denominan así en función de su “intensa” necesidad de mantenimiento que viene determinada no por su espesor, sino por el uso de la cubierta y el tipo de vegetación empleada tradicionalmente. Diseñadas para parecerse a los jardines a nivel del suelo, normalmente son accesibles a los usuarios, requieren de un diseño estructural especial (Yannas et al. 2006) e incluyen una gran variedad de especies vegetales, incluidos arbustos y árboles y es por ello que requieren de sustratos más profundos y más mantenimiento y riego (Getter & Rowe, 2006) (Yannas et al. 2006) (FLL 2018).

Sin embargo, este espesor mínimo, necesario para cumplir sus funciones, es el que ha pasado en muchos casos a liderar equivocadamente la distinción. Los valores varían según los autores, pero son típicamente mayores de 20 cm. (Yannas et al. 2006), en torno a los 15,2 cm. (Getter & Rowe, 2006), incluso pudiendo comenzar tan sólo en 12 cm. según las (FLL 2018).

Se limitan generalmente a cubiertas planas, puesto que normalmente están concebidas como espacios funcionales casi-urbanos de actividad al aire libre, utilizable por las personas y con unos determinados fines estéticos (Norma UNI-11235 2007) y según Ntoulas, N. Nektarios P. Charalambous, E. Psaroulis, A. (2013) sólo se pueden instalar en edificios que han sido especialmente diseñados para soportar las cargas que imponen, que pueden variar desde los 200 Kg/m² hasta más de 1.300 Kg/m².

6.2.2 Cubiertas verdes Extensivas

Por el contrario, las cubiertas extensivas se caracterizan porque deberían requerir de un mantenimiento mínimo. Típicamente no son accesibles al público,

incluso a veces no son si quiera visibles (Getter & Rowe, 2006) puesto que se utilizan habitualmente con el único fin de variar las condiciones ambientales internas y externas al edificio (Norma UNI-11235 2007).

Para cumplir estos objetivos, especialmente la limitación del riego y mantenimiento, estas cubiertas han sido tradicionalmente de poco espesor y sólo han empleado generalmente especies de poco crecimiento como musgos, herbáceas y algunas suculentas como los *Sedum* (Getter & Rowe, 2006).

Puesto que el reducido espesor, conlleva una retención de agua limitada, en zonas más áridas se han debido utilizar únicamente especies muy resistentes a la falta de agua (Yannas et al. 2006), mayoritariamente de la familia de las crasuláceas (Ntoulas et al., 2013).

Este bajo espesor conduciría también a reducidas cargas sobre el conjunto de la estructura del edificio, en torno a 20-50Kg/m² en seco según algunos autores (Yannas et al. 2006) equivalente a entre 70-140Kg/m² en saturación según otros (Nektarios et al., 2015) y también a un menor coste económico de instalación y de mantenimiento (Yannas et al. 2006) (Nektarios P. Ntoulas, N. Nydrioti E. Kokkinou, I. Bali, E. Amountzias, I. 2015) lo que hace que esta tipología sea mucho más habitual que las intensivas (Savi et al., 2014).

6.2.3 Cubiertas verdes mixtas o semi-extensivas

Sin embargo, bajo las duras condiciones climáticas del verano Mediterráneo las cubiertas extensivas con espesores muy bajos se enfrentan a problemas de crecimiento y supervivencia de la vegetación (Ntoulas et al., 2013), lo que redundaría en una disminución de todos los beneficios que las cubiertas vegetales correctamente establecidas aportan al edificio y a su entorno (Getter & Rowe, 2006).

Es por ello que surgen diversas corrientes de investigación que intentan aplicar soluciones híbridas que permitan el desarrollo correcto de la vegetación sin incrementar excesivamente el riego o mantenimiento de estas soluciones (Kotsiris, G. Nektarios P. Paraskevopoulou, A. 2012).

Muchos autores se refieren a esta tipología como cubiertas semi-intensivas mientras otros prefieren llamarlas semi-extensivas y se caracterizan por utilizar habitualmente espesores de sustrato intermedios, entre 10 y 20 cm. (Kotsiris et al.,

2012) (Nagase, A. Dunnett, N, Choi, M. 2010). Esta clasificación según su espesor no deja de ser una contradicción, puesto que el espesor de sustrato no es, en principio, el factor determinante de la división, sino el uso y mantenimiento.

Según Dunnett, N. y Nolan, A. (2004) las cubiertas semi-extensivas combinan las muchas ventajas medioambientales de las azoteas verdes extensivas con el potencial estético de las intensivas, permitiendo la supervivencia de un mayor rango de especies vegetales sin necesidad de imponer a los edificios grandes cargas estructurales.

Otros autores prefieren hablar de esta hibridación como cubiertas extensivas o intensivas “adaptables” (Ntoulas, N. Nektarios P. Charalambous, E. Psaroulis, A. 2013).

Sin embargo, esta clasificación habitual de las tecnologías de cubiertas vegetales en extensivas, intensivas y semi-extensivas/semi-intensivas solo se refiere a aspectos muy cualitativos, en lugar de estar ligadas a su comportamiento y beneficios cuantitativos.

Autores como (Fioretti et al., 2010) critican que las soluciones técnicas existentes en el mercado se dividan generalmente en estas categorías. Según los autores las variables de esta clasificación concreta son varios: el espesor del sustrato, el uso de la superficie, practicable o no y los costes o necesidades de mantenimiento. En consecuencia, según esta división, como norma general se espera que las cubiertas más delgadas o extensivas, no sean practicable y tampoco tengan costes elevados de mantenimiento, mientras que las más profundas o intensivas, puedan ser practicable y generen teóricamente mayores costes de mantenimiento por el tipo de vegetación que pueden albergar. Sin embargo, basar la nomenclatura en factores como el mantenimiento, que podría variar mucho para una misma cubierta en distintas regiones, puede resultar confuso.

Además, esta categorización no tiene en cuenta otros muchos factores como el clima y el régimen de precipitaciones, el tipo de vegetación empleado, los materiales que componen el sustrato, la orientación y pendiente de la cubierta y que podrían ser mucho más influyentes en los comportamientos energéticos, hídricos y de desarrollo de la vegetación que los anteriormente mencionados (Fioretti et al., 2010).

Se genera por tanto la necesidad de un esfuerzo de combinación de ambos aspectos, cualidad y cantidad, para la evaluación del comportamiento energético e hídrico de estas soluciones constructivas. Esta nueva clasificación técnica, más adecuada y objetiva, sería la base para una mayor concienciación en el desarrollo, diseño y planificación de estas soluciones orientadas a mejorar los resultados objetivos de una construcción más sostenible (Fioretti et al., 2010).

En la misma línea, autores como Razzaghmanesh et al. (2014) inciden en la necesidad de generar más investigación sobre el comportamiento de este tipo de cubiertas en climas cálidos, con el fin de que la vegetación pueda prosperar en esas condiciones climáticas extremas.

6.3 SELECCIÓN DE LA VEGETACIÓN PARA CUBIERTAS VERDES

6.3.1 Introducción

Por su propia naturaleza, las azoteas verdes constituyen un hábitat muy extremo para la proliferación de la vegetación, especialmente con sustratos poco profundos. Las condiciones de sequía, exposición al soleamiento y velocidad del viento se ven acrecentadas en las cubiertas de los edificios (Provenzano, M. Cardarelli, M. Crasso, M. Colla, G. 2010). Por tanto, la selección de especies debe ser estudiada atentamente para conseguir el óptimo desarrollo de las plantas y como consecuencia obtener los numerosos beneficios expuestos anteriormente.

Como norma general, aplicable a todos los climas, está aceptado que las mejores especies vegetales candidatas deben ser de fácil propagación, establecimiento rápido y alta densidad de cobertura (Farrell, C. Mitchell, R. E. Szota, C. Rayner, J. P. Williams, N. S. 2012). Las plantas que se expanden y cubren el sustrato rápidamente disminuyen la erosión y la aparición de otra vegetación no deseada (Getter & Rowe, 2006).

Por otro lado, es importante que las plantas sean resistentes a la sequía, a las heladas, y en gran medida autosuficientes, puesto que así se reduce la necesidad de mantenimiento y replantación. Especies duraderas, que se auto-resiembran o se reproducen vegetativamente se consideran generalmente como las más idóneas (Getter & Rowe, 2006)

A este respecto, se considera que las Suculentas son una familia que se adapta bien a estas condiciones, entre otros factores por su habilidad de limitar la transpiración y almacenar agua en sus hojas gruesas. En concreto dentro de las Crasuláceas, las del género *Sedum* han sido masivamente las más utilizadas por su tolerancia a la sequía y adaptabilidad a sustratos finos (Dunnett & Kingsbury, 2004). Sin embargo, como exponremos a continuación, la selección de especies puede y debiera ser mucho más amplia, teniendo en cuenta el gran número de especies endémicas y adaptadas a la sequía como existen en el Mediterráneo (Raimondo, F. Trifiló, P. Lo Gullo, M. Andri, S. Savi, T. Nardini, A. 2015).

Otra de las cualidades a tener en cuenta en la elección de vegetación es su tolerancia a la salinidad, especialmente importante cuanto más delgado sea el sustrato. Esto se debe a la acumulación en el suelo de sales minerales, proceso que se agrava en situaciones de riego deficitario y que podría afectar al desarrollo de las plantas (Schweitzer & Erell, 2014).

El tipo de vegetación que sería físicamente posible emplear en una cubierta vegetal, es decir la vegetación potencial (Ramankutty & Foley, 1999) o máximo biológico posible, depende de muchos factores, principalmente de la profundidad del sustrato. La clasificación que proponen las normas alemanas sobre planeamiento, construcción y mantenimiento de cubiertas verdes (FLL. 2018) es generalmente aceptada como válida por la mayoría de autores (Razzaghmanesh et al., 2014).

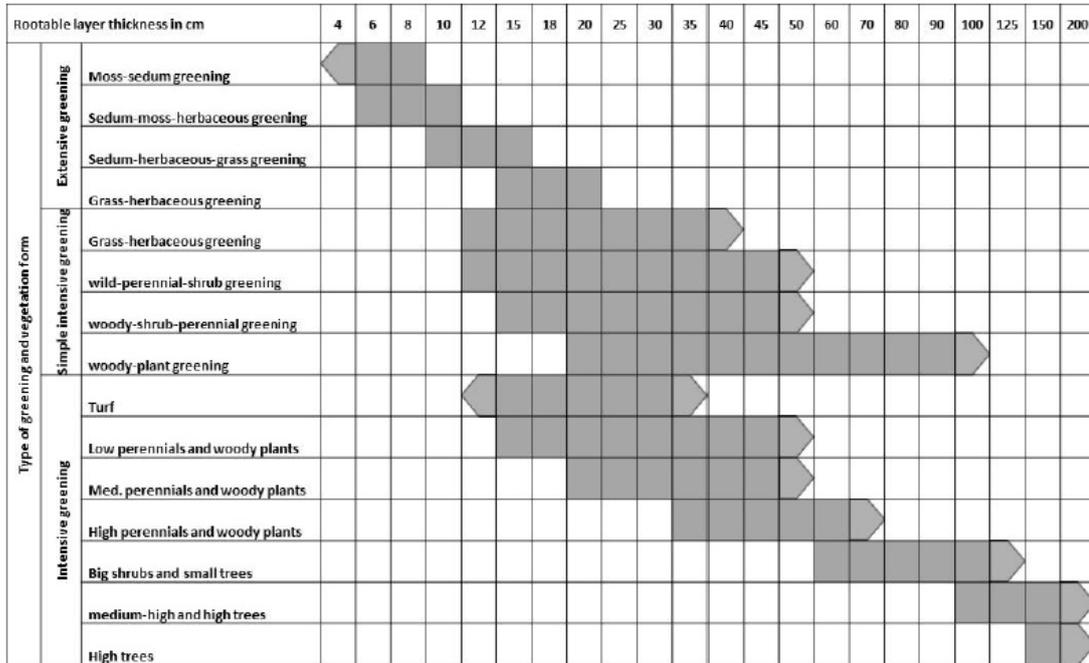


Tabla 6.01. Espesor de sustrato necesario/recomendado para diferentes tipos de vegetación. Fuente: FFL Alemanas 2018.

Para el caso de azoteas vegetales extensivas, con sustratos muy poco profundos de orden inferior a 15 cm., las posibilidades vegetales están limitadas por el reducido espacio para las raíces, además de factores secundarios como la mayor exposición de las mismas a temperaturas extremas o la teórica menor capacidad de almacenamiento de agua (Ntoulas et al., 2013).

Sin embargo, para cubiertas intensivas o semi-intensivas existe una mayor selección de “taxa” posibles debido a su mayor profundidad y a la mayor capacidad de acumulación de agua en el sustrato procedente de lluvia o de un posible riego adicional (Schweitzer & Erell, 2014).

Es importante destacar que las categorías vegetales provenientes de las FLL no están completamente clasificadas por su taxonomía, sino por su biotipo, lo que admite un amplio espectro de selección.

En primer lugar, para el caso de los climas cálidos se desestima la utilización de musgos, por la escasa protección solar que generan.

Por otro lado destaca el amplio rango de profundidades que concede la norma a la utilización de plantas del género *Sedum* específicamente. No está claro si la norma obvia por tanto otras crasuláceas similares o si las mismas podrían aparecer posteriormente bajo la definición de arbustivas.

En concreto, el *Sedum*, del que existen unas 400 especies, es un género de planta suculenta de la familia de las Crasuláceas del orden de las Saxifragales. Los *Sedum* pueden ser plantas tanto anuales como perennes, clasificadas como caméfitos pasivos debido a que en condiciones adversas responden acortando la longitud de sus tallos (Durhman, A. Rowe, B. 2007). Su crecimiento lateral colonizador lo convierte en un candidato ideal para las cubiertas vegetales. Además de los *Sedum*, otras suculentas como *Delosperma*, *Euphorbia* y *Sempervivum* también pueden ser apropiadas ya que comparten muchas características (Getter & Rowe, 2006).

El *Sedum* se engloba dentro de la gran familia de las Crasuláceas que se caracterizan principalmente por su capacidad de almacenar agua en sus hojas suculentas, lo que incrementa su capacidad de tolerar la sequía. Se encuentran prácticamente en todo el mundo y de forma mayoritaria en el hemisferio norte y el sur de África.



Figura 6.02. Ejemplar de *Sedum sediforme* en un entorno rocoso en la sierra de Ricote, Región de Murcia. Foto: autor.

Dunnnett and Kingsbury, 2004, sugieren que las especies que se desarrollan en entornos extremos, como montañas, costas, sustratos calcáreos, o semidesiertos sean probablemente buenas candidatas para cubiertas vegetales.

De hecho, muchas de las especies de *Sedum* utilizadas en cubiertas vegetales, han sido seleccionadas de zonas alpinas por su tolerancia a las heladas y supervivencia al invierno (Durhman & Rowe, 2007) derivadas de una menor succulencia de sus hojas. Sin embargo, este hecho puede conllevar una peor adaptación a climas cálidos y secos, puesto que su resistencia a las sequías se vería también mermada (Farrell et al., 2012) y deberá ser también estudiada.

Otra de sus características principales y la que las hace especialmente recomendadas para cubiertas vegetales, extensivas en particular, es el tipo de Metabolismo que pueden emplear en situaciones de estrés hídrico, llamado fotosíntesis CAM, o Metabolismo Ácido de las Crasuláceas, por sus siglas en inglés (VanWoert, N. Rowe, B. Andresen, J. Rugh, C. Xiao, L., 2005b). Este mecanismo consiste en realizar la fotosíntesis en dos períodos distintos: uno nocturno, en el que las plantas abren sus estomas para fijar el CO² y almacenarlo en las vacuolas de las células en forma de un ácido orgánico, habitualmente malato, y otro período diurno, en el que cierran sus estomas para evitar la pérdida de agua por evapotranspiración mientras que el ácido orgánico es convertido otra vez en CO² como fuente para la normal fotosíntesis (Getter & Rowe, 2006). Como ejemplo de la efectividad de este mecanismo, Lasalle, 1998, demostró que *Sedum album* L., conocida como Uva de gato, puede sobrevivir más de 100 días sin agua gracias a su fotosíntesis CAM.

Sin embargo, como contrapartida a esta mayor resistencia a las sequías, según la mayoría de autores, la capacidad del *Sedum* para evapotranspirar y por tanto refrescar la cubierta durante el verano es muy limitada, como se discutirá en capítulos posteriores. A esto hay que sumar su bajo porte y consiguiente limitada protección solar.

Por un lado, estudios como los de Voyde et al. (2010), afirman que las plantas crasuláceas, a las que pertenecen los *Sedum*, sí tienen una capacidad de evapotranspiración relevante siempre y cuando las condiciones ambientales no sean de sequía, caso en el que intentarán ahorrar agua limitando esta Evapotranspiración. En su ensayo se estudió la capacidad de evapotranspiración del *Sedum mexicanum* y el *Disphyma australe*, una planta crasulácea nativa y se

observó que, si las condiciones no son de estrés hídrico severo, ambas especies contribuyen activamente a la evacuación del agua sobrante en caso de tormentas, a la vez que toleran períodos prolongados de sequía, comportándose particularmente bien el *S. mexicanum*.

En contraposición (Wolf, D. Lundholm, J. T. 2008) afirman que, aunque la resistencia a la sequía es uno de los factores críticos para la supervivencia de las plantas en sustratos poco profundos, existe una correlatividad entre eficiencia en el uso del agua y el enfriamiento evaporativo que genera la vegetación al realizar sus funciones vitales.

Del mismo modo, VanWoert et al, 2005b, demostraron que, aunque varias especies de *Sedum* sobrevivían 88 días sin agua, sus coeficientes de evapotranspiración disminuían a prácticamente cero desde el día 4, por lo que su capacidad de enfriar el edificio y su entorno también se verían mermadas.

Así mismo, autores como Compton y Whitlow (2006), critican la tendencia existente en la industria a elegir plantas del *genus Sedum*, en base únicamente a su tolerancia a la sequía. Estas especies tienen una capacidad de evapotranspiración muy limitada y por tanto contribuyen muy poco a la correcta gestión del agua de tormentas o al refrescamiento pasivo del edificio. Según los autores, se debería profundizar más en la investigación de plantas que toleren a la vez condiciones muy secas o muy saturadas del sustrato, permitiendo eliminar el agua sobrante a través de la evapotranspiración.

Además, si existiera humedad disponible, de forma natural o por medio de riego, cabe preguntarse si no sería conveniente utilizar especies con mayores índices de evapotranspiración que podrían a su vez producir mayor enfriamiento.

Por consiguiente, no se puede afirmar tajantemente que las plantas más adecuadas para las cubiertas vegetales en climas cálidos sean necesariamente las más resistentes a la sequía. Queda, por tanto, en entredicho que el género *Sedum*, al menos como monocultivo, sea la opción más adecuada a emplear en climas cálidos donde la demanda de refrigeración es uno de los factores fundamentales, sino que serán las condiciones particulares de cada aplicación las que dicten la estrategia más interesante, tal y como proponían Kotsiris, G. Nektarios P. Ntoulas, N. Kargas, G. (2013) en su trabajo sobre el “Enfoque Adaptativo” para cubiertas vegetales en el Mediterráneo.

Continuando con las recomendaciones de las FLL (FLL, 2018), en el segundo escalón en necesidades de profundidad de sustrato, la norma contempla el uso de hierbas/herbáceas, definición muy amplia que engloba familias de varios órdenes y clases diferentes. Estas se caracterizan principalmente por la ausencia de tallos leñosos, a diferencia de las arbustivas y los árboles. También pueden ser plantas tanto anuales como perennes. Así mismo, la mayor parte de las especies del género *Sedum* son plantas herbáceas como también lo son algunas otras Crasuláceas, familia a la que pertenecen los *Sedum* (Universidad de Murcia, 2020).

Entre las herbáceas que se han considerado para los experimentos realizados en este estudio, se encuentran el *Enneapogon Persicus*, *Brachypodium retusum* y el *Lygeum spartum*, pertenecientes a la familia de poáceas (Poaceae), también llamadas gramíneas. Esta familia está compuesta principalmente por plantas herbáceas y muy raramente leñosas (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2019) (Universidad de Murcia, 2020).



Figura 6.03. Fotografía de *Enneapogon Persicus*. Especie africana y mediterránea oriental que en la Península sólo se encuentra en dos localidades de la Región de Murcia. Fuente: Universidad de Murcia, (2020).

Por último, con una necesidad de sustrato mayor, aparecen las arbustivas y subarbustivas. Esta definición también engloba un número muy alto de géneros y familias, incluso de distinto filo o división.

Por un lado, se encontrarían géneros como las efedras, plantas gimnospermas, con formas de arbusto de porte mediano que se desarrollan sobre todo en zonas áridas del hemisferio norte (Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. 2015).

También se encontrarían en esta categoría, entre otras, parte de las lamiáceas (Lamiaceae), antes conocidas como Labiatae (labiadas), plantas angiospermas en parte herbáceas y en parte arbustivas entre las que se encuentran las salvias, el tomillo o el romero, también muy adaptadas a climas semiáridos (Sánchez Gómez, P. et al. 2015) (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2019).



Figura 6.04. Ejemplares de tomillo (izq.) y sopaenvino (der.) en las sierras litorales de Águilas. Fuente: autor.

Así mismo, estarían englobadas en esta organización la familia de las Plumbaginaceae, englobadas en el orden Caryophyllales, a la que pertenecen entre otros el *Limonium caesium*, endemismo del sureste de España que se asienta sobre todo en saladares y terrenos yesosos y margosos (Sánchez Gómez, P. et al. 2015) (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2019).

Se puede por tanto afirmar que la variedad de especies aplicables teóricamente a las cubiertas vegetales es excepcionalmente amplia, por lo que habría que tener en cuenta otras consideraciones adicionales, mucho más restrictivas en ese caso, con el fin de acotar las posibilidades. Entre estos factores cabría destacar la adaptación de las especies elegidas a la dura climatología del

lugar y de la cubierta en particular, utilizando especies nativas ya adaptadas o plantas exóticas muy resistentes.

6.3.2 Criterios de selección

6.3.2.1 *Especies nativas y exóticas*

Aunque las cubiertas verdes son creadas artificialmente por el ser humano, la utilización de especies locales o regionales puede contribuir a la restauración de la naturaleza e incluso contrarrestar la destrucción de los hábitats naturales ocupados por la acción urbanizadora (Van Mechelen et al., 2014).

Paralelamente, otros trabajos como (Dunnett, N. 2006) critican este enfoque localista que plantean estos autores, por considerarlo excesivamente reduccionista. En su caso, la crítica se centra en el supuesto mayor incremento de la biodiversidad que el uso de asociaciones vegetales previamente existentes en el entorno cercano con especies exclusivamente nativas producirían en una cubierta verde. No obstante, su conclusión es que el uso de especies tanto locales como exóticas, algo que por otro lado es complicado de definir, no es estrictamente positivo por la proveniencia de la especie, sino por sus características individuales y por tanto existirán especies nativas perfectamente idóneas para su utilización en cubiertas verdes.

Existe sin embargo muy limitada información científica relativa a la selección, crecimiento y mantenimiento de la vegetación autóctona en climas Mediterráneos o cálidos equivalentes (Provenzano et al. 2010),

En otras latitudes, como por ejemplo para climas templados como el de gran parte de Norte América, los *Sedum* han demostrado tener mejor rendimiento que ciertas especies nativas en sustratos poco profundos (Klein & Coffman, 2015).

Sin embargo, no está demostrado que estas especies se puedan adaptar a todas las localizaciones. En concreto, las especies más comunes en la horticultura y los viveros podrían no ser válidas para climas cálidos y secos (Dvorak y Volder, 2012), (Van Mechelen et al., 2014).

De hecho, Klein y Coffman (2015), tras un estudio en una cubierta real en Oklahoma, afirman que las plantas nativas se establecen con mayor rapidez que

las suculentas exóticas bajo condiciones extremas. En sus conclusiones recomiendan no utilizar de forma genérica el *Sedum* en climas cálidos y afirman que es necesaria más investigación sobre cada una de las subespecies.

En la misma línea, (Dvorak & Volder, 2012), afirman que la utilización exclusiva de *Sedum* exóticos ignora el contexto ecológico regional y animan a utilizar especies nativas de pradera. Para ello, realizan un estudio con veinticuatro cubiertas diferentes y deducen que el bioma de pradera, nativo en su caso, es altamente adaptativo y ofrecen gran diversidad.

Por tanto, en el presente estudio se seleccionará únicamente vegetación autóctona, específicamente de la Región de Murcia y provincias limítrofes, puesto que presumiblemente estas especies que podemos encontrar en hábitats naturales semi-áridos están bien adaptadas a las duras condiciones que ofrece una cubierta vegetal (Provenzano et al., 2010).

6.3.2.2 *Monocultivares y mezcla de especies*

Aunque la diversidad de especies en las cubiertas verdes es citada repetidamente como beneficiosa (Dvorak & Volder, 2012) (Dunnett & Kingsbury, 2004) (Van Mechelen et al., 2014) (Wolf & Lundholm, 2008), el número de trabajos empíricos que desarrollan esta hipótesis es muy limitado (Sutton, R. 2015).

Hasta la fecha, la mayor parte de los estudios que han sido publicados sobre vegetación en cubiertas verdes ha sido realizada con una única especie por experimento (Razzaghmanesh et al., 2014). Esto se puede deber parcialmente a la mayor facilidad a la hora de aislar y cuantificar los complejos fenómenos físicos y biológicos que ocurren en una infraestructura de este tipo. Sin embargo, supone una simplificación arriesgada, pues podrían existir especies de plantas muy interesantes para las cubiertas mixtas que han sido descartadas prematuramente por el hecho de haber sido estudiadas aisladamente (Sutton, R. 2015).

En esta línea, según Klein y Coffman (2015) uno de los retos de las cubiertas multicultivares es precisamente lograr la estabilidad de esta mezcla existente en una comunidad vegetal diversa. El hecho de que cada tipo de especie tenga una velocidad de crecimiento diferente e incluso a veces una forma de plantación distinta puede condicionar la composición y estabilidad de la cubierta vegetal.

No obstante, Wolf y Lundholm (2008) sugieren que plantar múltiples especies con ratios de crecimiento diferentes podría optimizar la cobertura vegetal y mejorar los beneficios en términos de temperatura e hidrología que estas soluciones aportan.

Como consecuencia, para los experimentos con módulos de cubierta vegetal que se han realizado como parte de esta investigación, se decide utilizar una mezcla de especies, todas ellas autóctonas, con un doble fin. Por un lado, se pretende dotar a la cubierta de un mayor grado de biodiversidad y resiliencia (Provenzano et al., 2010), replicando algunos de los hábitats Mediterráneos existentes en la naturaleza, tal y como sugieren (Van Mechelen et al., 2014). Por otro, la diversidad de especies aporta un componente estético añadido, seleccionando así mismo especies con diferentes morfologías, colores y distintas épocas de floración, para conseguir un prototipo de cubierta más acorde al entorno natural más próximo.



Figura 6.05. La diversidad morfológica y cromática del hábitat natural de las sierras litorales de Águilas, Murcia. Fuente: autor.

6.3.2.3 Valor estético

En el caso de la naturación urbana, existen entre los investigadores, e incluso en el mercado, dos corrientes de pensamiento claramente diferenciadas.

Una de ellas aboga por un enfoque más “naturalista” o “ecologista” mientras que la otra, más horticultural, propugna una visión más racionalista pero siempre defendiendo que cualquier enfoque es correcto, siempre que la evidencia lo avale. El enfoque más naturalista da como resultado una apariencia más salvaje de las zonas verdes creadas, mientras que el horticultural produce formas más ordenadas y racionales (Dunnett, N. 2006).

Sin embargo, la estética y la ecología no tienen por qué estar reñidas (Dunnett, N. 2006). Es posible crear cubiertas verdes que maximicen la biodiversidad y el desarrollo de la vegetación y que a su vez sean estéticamente satisfactorias. De hecho, dos de los factores fundamentales según su estudio son el color y el volumen, ya que está comprobado que la existencia de colorido y su diversidad aumentan de forma considerable la opinión favorable del público respecto de cualquier vegetación recreada por el hombre, como es el caso de las cubiertas ajardinadas.

Es por tanto fundamental para el éxito de las cubiertas verdes, que el público perciba un valor estético añadido, si bien es cierto que esto dependerá completamente del contexto sociocultural (Dunnett, N. 2006).



Figura 6.06. Cubierta vegetal de la Academy of Sciences de California, diseñado por el arquitecto Renzo Piano (RPBW). Fuente: <http://www.rpbw.com/projectcalifornia-academy-of-sciences>.

Para el caso de la vegetación aplicable a los climas semi-áridos, cobra especial importancia la apariencia de la cubierta durante todo el año. Por ejemplo,

algunas especies tienen períodos durmientes en los que tienen aspecto marrón y seco, particularmente durante los largos veranos Mediterráneos (Getter & Rowe, 2006).

Por el contrario, para utilizar la gran mayoría de anuales y herbáceas perennes con flores es necesario riego o mayores sustratos de los normalmente utilizados en cubiertas extensivas y semi-intensivas. Si no existiera riego, especies de suculentas como *Sedum*, *Sempervivum* y *Delosperma* se consideran una buena elección por su capacidad para soportar períodos de sequía prolongados y las duras condiciones presentes en las cubiertas (Getter & Rowe, 2006) pero su valor estético puede no ser el más deseado.

Por tanto, cobra especial sentido la utilización de combinaciones de especies que aporten diferentes formas, colores y tengan distintos períodos de floración o de aparente desecación, con el fin de obtener una mayor diversidad estética en cualquier época del año.

6.3.2.4 Clima del lugar y microclima de la cubierta

Las condiciones climáticas particulares de la zona y el microclima de la cubierta tienen un impacto muy grande en el rango de selección de especies. Los factores que determinarán la supervivencia de un género en una zona concreta son: temperaturas medias (máximas y mínimas), temperaturas máximas y mínimas absolutas, niveles de radiación incidente, viento y cantidad y distribución de lluvias anuales (Getter & Rowe, 2006)

La tolerancia a la sequía es uno de los parámetros más importantes para la selección de plantas, ya que en las cubiertas vegetales se presentan normalmente al mismo tiempo valores muy altos de radiación con valores muy bajos de humedad del sustrato, especialmente en sistemas de muy poco espesor (Wolf & Lundholm, 2008).

La orientación e inclinación de la cubierta, así como edificaciones cercanas que proyecten sombra sobre la misma, modifican los niveles de radiación recibida y la humedad del sustrato y serán por tanto factores también a tener en cuenta. Del mismo modo, la presencia de torres o elementos de refrigeración o ventilación puede modificar la humedad del sustrato y la existencia de químicos en el aire procedentes de edificaciones industriales puede condicionar el crecimiento de las plantas (Getter & Rowe, 2006).

La disposición física de la azotea también puede ser un elemento que influya en el comportamiento térmico y biológico de las mismas. Tal y como afirman Schweitzer y Erell (2014) el viento incrementa el gasto de agua para riego, por lo que la altura de los petos de cubierta podría disminuir su consumo desviando el flujo de aire y reduciendo su velocidad cerca de las plantas.

6.3.2.5 *Inclinación de la cubierta*

Aunque la literatura científica disponible es escasa, se puede afirmar que la inclinación de la cubierta también puede desempeñar un papel importante en la elección de las especies vegetales a utilizar, principalmente por dos condicionantes.

El primero es la propia capacidad de la especie de crecer en terrenos llanos o muy inclinados. En cubiertas con grandes pendientes se favorecerá la utilización de especies fijadoras de terreno y a ser posible de crecimiento rápido, con el fin de minimizar la erosión y desplazamiento del sustrato (Getter & Rowe, 2006).

Por otro lado, la inclinación de la cubierta tiene efectos sobre la retención de agua de lluvia y por tanto en la mitigación de los efectos de lluvias torrenciales en los sistemas urbanos de recogida. De la misma forma que en el supuesto anterior, cubiertas muy inclinadas podrían requerir de una vegetación con menores necesidades hídricas, puesto que el sistema de cubierta presenta menor capacidad de retención de agua.

De hecho, se ha demostrado que, para episodios de lluvias ligeras, a mayor inclinación, las cubiertas verdes presentan menor capacidad de retención de agua. Sin embargo, para episodios de precipitaciones intensas la influencia de la inclinación para cubiertas comprendidas entre el 2 y 6.5% de inclinación no es significativa (VanWoert, N. et al. 2005a).

Por contra, (Razzaghmanesh et al., 2014), realizan un experimento utilizando probetas con 1º y 25º de pendiente y observan que la vegetación que en su caso utilizaron, se comporta ligeramente mejor en aquellos módulos con menor inclinación, aunque las diferencias que aprecian son muy ligeras.

6.3.2.6 Composición del sustrato

La supervivencia de la vegetación en una cubierta verde se ve fuertemente determinada por la composición del sustrato, especialmente por su capacidad de retención de agua (Farrell et al., 2012), especialmente en las regiones cálidas y secas, donde la disponibilidad de agua fluctúa dramáticamente entre episodios de lluvias (Nagase et al., 2010).

Entre las exigencias que debe cumplir un sustrato para cubiertas verdes, especialmente para extensivas, se encuentra el bajo peso, mínima compactabilidad, alta permeabilidad, poseer una estructura estable y una actuación excelente a largo plazo (Kotsiris, G. Nektarios P. Ntoulas, N. Kargas, G. 2013). Además, sería deseable que los materiales fueran de procedencia cercana, con el fin de minimizar la huella de carbono y fomentar la sostenibilidad de la economía local (Kotsiris et al., 2012).

Para su uso específico en cubiertas vegetales, durante las últimas décadas se han desarrollado muchos tipos de sustratos ligeros, principalmente minerales, con un bajo contenido en materia orgánica y una elevada capacidad de retención de agua que mejora su disponibilidad para las plantas incluso en las condiciones extremas que imponen estas soluciones constructivas (Fioretti et al., 2010) y la investigación debería continuar en esa línea, especialmente para zonas cálidas y semi-áridas (Farrell et al., 2012).

Aunque los requisitos de algunas normativas que regulan estas soluciones constructivas establecen unos límites de densidades en seco para estos sustratos aligerados de entre 350 y 1.000 Kg/m³ (Norma UNI-11235 2007), las declaradas en la literatura científica se encuentran más habitualmente entre los 650 y los 1.100 Kg/m³ (Kotsiris et al., 2013) (Razzaghmanesh et al., 2014), condicionadas por la diferente proporción de materiales empleados. En concreto, existen soluciones comerciales como la utilizada por (Savi et al., 2014) de Harpo Group Italia (mezcla de lapillus, pumita y zeolita) que cuenta con 848 Kg/m³. Excepcionalmente algunos autores utilizan medios de crecimiento con densidades en seco de hasta 1370 Kg/m³ (Getter, K. Rowe, B. 2007).

Sin embargo, en una azotea verde, el peso del sustrato saturado tiene un papel casi o más relevante que el peso en seco de los materiales, puesto que este soportará la sobrecarga máxima que generará la cubierta sobre la estructura. Se ha estimado que un suelo natural puede alcanzar un peso saturado de

aproximadamente 2300 Kg/m³, mientras que los sustratos artificiales que recomiendan algunos de estos autores se encuentran alrededor de 1200-1300 Kg/m³ en saturación (Savi et al., 2014) (Nektarios et al. 2011).

Por tanto, el sustrato ideal debe conseguir un correcto balance entre ser excepcionalmente ligero, ofreciendo buen drenaje y buena aireación a las plantas frente a la capacidad de mantener en el tiempo el agua y los nutrientes que permitan el desarrollo de la vegetación (Farrell et al., 2012). La composición del sustrato debería depender por tanto de la disponibilidad de materiales locales, el tipo de plantas a utilizar, la zona climática y el nivel de mantenimiento esperado.

Además, no debe descomponerse con el tiempo, por lo que sus principales elementos deben ser de carácter mineral como arcillas, pizarras o esquistos expandidos. Adicionalmente puede contener otros componentes inorgánicos como piedra pómez o pumita, perlita, vermiculita, arenas y ladrillo o material cerámico reciclado y molido (Dunnett & Kingsbury, 2004).

Por este mismo motivo, algunos autores no recomiendan utilizar altos niveles de compost ya que se descompone con el tiempo y produciría una compactación del sustrato (Farrell et al., 2012) resultando impráctico rellenar o reemplazar el sustrato de una cubierta continuamente.

Sin embargo, estudios como el de (Kotsiris et al., 2013) en Atenas, comparan el comportamiento de la vegetación en tres tipos de sustrato, y en todos los marcadores de desarrollo de las plantas se comporta mejor el sustrato que contiene un 30% de compost (junto con un 65% de piedra pómez) frente a los dos sustratos que no contienen. Como valor añadido, esta mezcla generaba también la menor huella de carbono de las tres opciones estudiadas, lo que contribuye adicionalmente a disminuir el negativo impacto medio ambiental de otros compuestos orgánicos como la turba.

Por su parte, (Razzaghmanesh et al., 2014), realizan un estudio utilizando módulos experimentales con tres tipos de sustrato basados respectivamente en machaca de ladrillo-escoria, escoria-corteza de pino y compost orgánico-escoria, siendo los dos últimos, los que contenían materia orgánica, los que más favorecieron el crecimiento y establecimiento de la vegetación, frente al primero de ellos, sin materia orgánica añadida.

A pesar de este mejor ratio de establecimiento y crecimiento que genera la presencia de compost en el sustrato, un exceso tampoco es positivo en cubiertas

sin riego, puesto que su menor retención de agua comparado con la turba conlleva una menor resistencia de la vegetación a la sequía (Ntoulas et al., 2013).

En cuanto a los componentes mayoritarios que deben componer el sustrato, como ya se ha comentado, deben ser principalmente de carácter mineral o inorgánico y de bajo peso como son la arcilla y pizarras expandidas o la piedra pómez y otras rocas volcánicas de poca densidad. Según un estudio llevado a cabo en Atenas, con *Zoysia matrella*, es preferible utilizar un sustrato a base de piedra pómez con baja participación de finos. De hecho, reducir la cantidad de finos por debajo del 15% y aumentar el porcentaje de pumita fue beneficioso para la resistencia a la sequía de la hierba de Manila utilizada en el experimento (Ntoulas et al., 2013).

Sin embargo, un estudio de (Getter & Rowe, 2006) comparó el crecimiento y supervivencia sin ningún riego de seis especies de herbáceas nativas y dos tipos de *Sedum* en cinco tipos de sustratos de 100 mm de espesor que contenían desde el 60% al 90% de pizarras expandidas y comprobaron que a mayor porcentaje de pizarras menores eran los ratios de crecimiento y peores los resultados estéticos. Además, al cabo de los tres años, las probetas que contenían *Sedum* habían conseguido un 100% de cobertura, mientras que las herbáceas nativas habían desaparecido por completo, concluyendo que para el caso de plantas suculentas un porcentaje de hasta el 80% de pizarras expandidas constituía un buen medio de crecimiento y reducía considerablemente el peso sobre la estructura, pero para plantas no suculentas serían necesarios mayores espesores, mayor contenido orgánico o riego adicional.

Por otro lado, el uso de perlita expandida como agregado es muy recomendable por su buena distribución en cuanto a tamaño de partículas, su alta capacidad de retención de agua, estimada en un 31% de volumen en estado de saturación y su peso muy reducido, 61 Kg/m³. Sin embargo, remarcan los autores que sólo es posible su utilización en las regiones cálidas como el sur del Mediterráneo, ya que los ciclos de hielo/deshielo podrían afectar negativamente a sus propiedades físicas (Nektarios et al. 2011).

La incorporación de Zeolita se utiliza para mejorar el crecimiento de la vegetación, puesto que es capaz de almacenar N y K en sus microcanales con el fin de que las plantas puedan hacer posteriormente uso de estos nutrientes (Kotsiris et al., 2013)

Aunque las normas FLL alemanas permiten para las cubiertas extensivas el uso de partículas finas, menores a 0.063mm y compuestas principalmente por arenas y arcillas, existe en el mercado una tendencia a eliminar los finos de la composición del sustrato (Nektarios et al. 2011).

No obstante, en un estudio llevado a cabo en Atenas, (Nektarios et al. 2011) observaron que durante los períodos de sequía la humedad en el sustrato que contenía un 15% de finos era mayor en comparación con otro sustrato sin finos. Concluyeron por tanto que los sustratos con finos tenían una mayor capacidad de retención de agua. Adicionalmente, observaron que, durante el período de establecimiento, el sustrato con el 15% de finos también producía un mayor crecimiento de la vegetación y esto podía deberse a que, aunque su porosidad era inferior a la del sustrato sin finos, 44.3 frente al 49%, la cantidad de agua fácilmente disponible para las plantas era superior en el sustrato con finos, 14.7 frente a sólo 11% del sustrato que no contenía partículas finas.

Para mejorar el comportamiento de las cubiertas verdes en el clima Mediterráneo, una de las líneas de investigación más prometedoras persigue conseguir el incremento de la capacidad de retención de agua en el sustrato para asegurar una mayor disponibilidad de agua a las plantas a la vez que se mantienen reducidos espesores, pesos y también costes (Farrell et al., 2013) (Papafotiou, M. Pergialioti, N. Tassoula, L. 2013).

Diversos autores han estudiado la incorporación al sustrato de aditivos que mejoren la retención y disponibilidad posterior de agua. Uno de los más prometedores es el Hidrogel, un polímero sintético con una alta capacidad de absorción de agua, hasta 115 veces sus peso cuando está saturado (Savi et al., 2014) La efectividad de estas sustancias en cuanto a crecimiento y disponibilidad de agua de las plantas está condicionada por las propiedades del sustrato y del propio aditivo y presenta diferencias entre distintas especies vegetales (Farrell, C. Ang, X. Rayner, J. 2013).

En un experimento en Trieste, utilizando la especie *Salvia officinalis*, se demostró que proporciones muy bajas de hidrogel, desde 0.3 hasta 0.6% del peso, mejoraban la disponibilidad de agua a las plantas en un 45 y un 131% respectivamente, al menos durante la fase de establecimiento. Sorprendentemente, su efecto fue mayor en sustratos más finos, 8 cm. frente a 12 cm., algo que los autores achacan a que estos limitan el crecimiento excesivo de la

biomasa en las fases iniciales (Savi et al., 2014) lo que resulta en unas menores necesidades hídricas de la vegetación que durante los períodos secos pueden ser cubiertas por el agua acumulada en el sustrato modificado con hidrogel.

Como elemento final a tener en cuenta para la elección del tipo de sustrato, algunos autores (Bevilacqua et al., 2015) afirman que debido a la variación espacial temporal de las cubiertas verdes que no son elementos homogéneos como muchas veces se describen y modelan, especialmente en regiones con dificultades para que las plantas se desarrollen correctamente, el sustrato debería ser suficientemente aislante y tener un buen índice de reflexión, para compensar temporalmente las posibles áreas sin cobertura vegetal.

A este efecto está demostrado que la combinación de una densidad reducida con una alta porosidad redundan positivamente también en la transmitancia térmica del conjunto, debido a la mayor cantidad de aire atrapado en el sustrato y a que el agua sobrante se descarga de forma más rápida (Kotsiris et al., 2012).

6.3.2.7 Profundidad del sustrato

La profundidad del sustrato también selecciona qué especies pueden crecer y sobrevivir en las cubiertas vegetales (Gómez Campo, C. Gómez Tortosa, L. 1996) (Farrell et al., 2012) y se puede considerar como el factor más determinante (Ntoulas et al., 2013) (Kotsiris et al., 2012).

Sustratos muy delgados, secarán antes favoreciendo únicamente a algunas especies que ya se desarrollan en ecosistemas similares en la naturaleza (Dunnett & Nolan, 2004), mientras que sustratos más profundos que acumulan más agua, permiten el desarrollo de especies más duraderas y tolerantes a las sequías como arbustos leñosos (Schweitzer & Erell, 2014), herbáceas y una gran variedad de plantas de flor tanto anuales como perennes (Dunnett & Nolan, 2004).

Además, la cantidad de sustrato, en combinación con su composición, tiene un efecto directo en el peso de la cubierta y en su coste de construcción (Nektarios et al., 2011).

Aunque espesores mayores podrían retener mayor cantidad de agua y albergar especies arbustivas más duraderas y tolerantes a la sequía, para los casos de rehabilitación, está claro que las cubiertas extensivas, aquellas con espesores

reducidos, son preferibles debido al poco peso que ejercen sobre la estructura existente (Schweitzer & Erell, 2014).

A este respecto, numerosos estudios han sido llevados a cabo intentando determinar cuál es el espesor mínimo en el que la vegetación podría desarrollarse satisfactoriamente con la intención de reducir al máximo el peso adicional que añade la cubierta verde sobre la estructura del edificio y también el coste de su construcción. (Getter & Rowe, 2006) (VanWoert, N. et al. 2005a) (Nektarios et al., 2011).

Con este mismo propósito, (Rowe, B, Getter, K. Durhman, A. 2012) realizaron un experimento en Michigan donde a lo largo de siete años observaron el establecimiento y supervivencia de 25 especies suculentas en espesores de 7,5, 5 y 2,5 cm. Encontraron que las especies *Sedum acre* y *Sedum album* podían sobrevivir incluso en el espesor más bajo, convirtiéndose en dominantes. Al mismo tiempo concluyeron que a menor espesor el número de especies decrecía más rápido con lo que la diversidad de la cobertura vegetal era menor.

Por su parte, autores como (Nektarios et al., 2015) consiguen ratios aceptables de supervivencia de la especie *Sedum sediforme* en tan sólo 7,5 cm. de espesor sin riego o con un riego mínimo en clima Mediterráneo.

Sin embargo, para la mayor parte de especies fuera del género *Sedum*, espesores algo superiores son necesarios para su establecimiento y supervivencia.

Por un lado, (Schweitzer & Erell, 2014) en un experimento en Tel Aviv con cuatro especies vegetales no pertenecientes al *Sedum* y cada una con distintos mecanismos de adaptación, consiguen resultados positivos en tan sólo 5 cm. de sustrato. Como contrapartida, para garantizar la supervivencia de las plantas necesitaron emplear cantidades importantes de riego, incluso en la especie más eficiente en el uso del agua, la suculenta *Aptenia cordifolia*.

En otro caso, (Nektarios et al., 2011) en un estudio en Atenas, investigaron sustratos con dos profundidades, 7,5 y 15 cm., utilizando *Dianthus fruticosus*, una especie de clavelina nativa y concluyeron que el crecimiento, el peso seco de las hojas y el contenido de clorofila era mayor en el más profundo de los dos, durante todas las fases del estudio, aunque en 7,5cm. y con riego limitado también podría ser viable su supervivencia y desarrollo.

Por su parte, Razzaghmanesh et al. (2014) y Razzaghmanesh, M. Beecham, S. Kazemi, F. (2014), realizaron en Australia dos experimentos distintos utilizando

probetas con 10 y 30 cm. de espesor, replicando espesores típicos de cubiertas extensivas e intensivas respectivamente. Concluyeron que las probetas con mayor espesor de sustrato favorecen en mayor medida todos aquellos aspectos relacionados con el crecimiento y cobertura de las tres especies vegetales que utilizaron: volumen de las raíces, grado de supervivencia, altura, peso seco final y ratio de cobertura de las plantas.

Igualmente, Benvenuti, S. Bacci, D. (2010) demostraron que la mayoría de las 20 especies originarias de hábitats secos mediterráneos con las que experimentaron obtuvieron un mejor ratio de cobertura y crecimiento en las probetas con 20 cm. frente a las que tenían 15 cm. de espesor de sustrato.

En la misma línea, Kotsiris et al., (2012), en un estudio en Atenas con cubiertas semi-intensivas de 20 y 30 cm. de espesor pobladas con ejemplares de *Lavandula angustifolia*, también comprobaron que los sustratos más profundos favorecían las condiciones fisiológicas y el crecimiento de la vegetación.

Sin embargo, a pesar de que la mayoría de autores coinciden en que, a mayor profundidad del medio, mayor crecimiento y supervivencia de la vegetación con independencia de las especies (Durhman et al., 2004) (Kotsiris et al., 2012) (Schweitzer & Erell, 2014), incrementar excesivamente el espesor del sustrato podría ser contraproducente para algunas especies.

Está ampliamente aceptado, (Savi et al., 2014) (Kotsiris et al., 2012) (Nagase et al., 2010) que sustratos muy profundos, que permiten un desarrollo mayor de las raíces, favorecen la acumulación excesiva de biomasa en la vegetación, lo que a su vez genera mayor estrés hídrico a las plantas en los periodos de sequía por un consumo más rápido de las reservas de agua. En cambio, espesores menores de sustrato generan unos crecimientos más moderados de la vegetación, lo que conlleva un uso más conservador del agua y un mejor estado fisiológico de las plantas, al menos en las fases de establecimiento.

Incluso, según Nektarios et al. (2015), en las fases iniciales de establecimiento de las plantas, sustratos menos profundos podrían ser de ayuda a la hora de alcanzar y consumir el agua acumulada por encima del geotextil o en el estrato de drenaje. De hecho, en su experimentación con *Sedum sediforme*, concluyeron que, durante el primer año, el crecimiento de esta especie fue mejor en sustratos de 7,5 cm. comparado con otros de 15 cm., debido a que las raíces superficiales de las plantas no obtenían ventajas de este sustrato adicional.

Conclusiones similares habían obtenido previamente Dunnett y Nolan (2004), que demostraron que el *genus Sedum* no se beneficiaba del agua adicional acumulada a partir de 200mm de profundidad.

Por tanto, lo realmente interesante sería poder determinar la profundidad de sustrato mínima que permite un correcto desarrollo de la vegetación junto con buenos resultados estéticos y energéticos para cada región climática, tipo de sustrato o variedad botánica.

En esa dirección, Sun, T. Bou-Zeid, E. Ni, G. H. (2014) publicaron un estudio donde evalúan la eficiencia energética de varias soluciones y afirman que el espesor óptimo de sustrato se encuentra en el término medio entre espesores muy profundos, que limitan la evaporación en la superficie al redistribuir más agua en el fondo, y espesores muy delgados, que no acumulan suficiente agua y se secan muy rápido empeorando el rendimiento.

En el estudio, que emplea la herramienta de simulación PROM (Princeton Roof Model)¹³, los autores analizan las dos variables físicas más representativas de una cubierta de *Sedum*: su espesor y la influencia del contenido de humedad. Para el caso concreto del *Sedum*, el espesor más bajo de los tres empleados, 15, 20 y 30 cm., es el más eficaz en proveer agua a las raíces de las plantas, a pesar de tener una capacidad de retención de agua menor. Esta mayor disponibilidad de agua en las capas más superficiales provoca una mayor evaporación y como consecuencia un mayor flujo de energía latente hacia el exterior, combatiendo mejor el efecto de isla de calor. Sin embargo, puesto que el sustrato actúa como aislamiento térmico, el flujo de calor hacia el interior del edificio también es algo mayor en los casos de sustratos delgados. Para combatir este efecto, los investigadores sugieren añadir una capa moderada de aislamiento térmico adicional al conjunto.

Concluyen por tanto que el espesor de sustrato óptimo para su estudio serían 15 cm. añadiendo una capa moderada de aislamiento por debajo. Profundidades mayores de sustrato, a pesar de su mayor poder aislante, no mejoran necesariamente el comportamiento térmico global, puesto que tienden a acumular el agua en las capas inferiores, donde no contribuye al enfriamiento evaporativo de la cubierta. Espesores demasiado delgados tampoco son

¹³ Parte de la herramienta PROM se encuentra disponible online en la página web: efm.princeton.edu/EEB/model.html y permite comparar los resultados energéticos de distintas soluciones de cubiertas verdes determinadas por el usuario.

recomendables, puesto que su capacidad de retención de agua sería muy limitada y ello dificultaría el crecimiento de la vegetación. En ese sentido algunos autores que afirman que el riego artificial podría compensar parcialmente la reducción del espesor de sustrato (VanWoert, N. et al. 2005b).

6.3.2.8 Riego, mantenimiento y ciclo de vida

Los resultados de numerosos estudios claramente demuestran que aunque en determinados casos es posible la supervivencia de las plantas en experimentos sin riego (Nektarios et al., 2015) (Nardini et al., 2012) (Olivieri et al., 2013), la existencia del mismo mejora las condiciones de establecimiento, crecimiento y cobertura de la vegetación en cubiertas verdes (Razzaghmanesh et al. 2014) (Farrell et al., 2012) y podría constituir un factor más determinante que el propio espesor del sustrato (Benvenuti & Bacci, 2010).

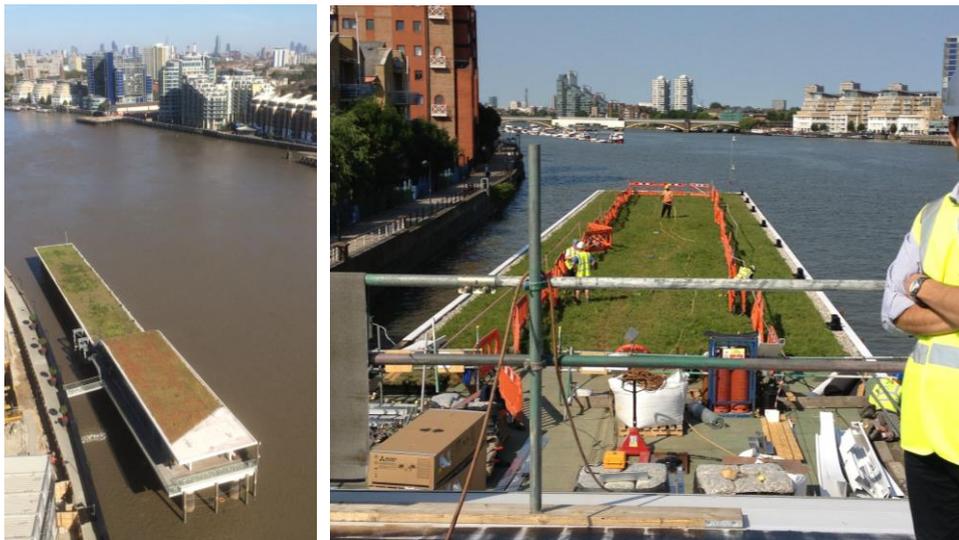


Figura 6.07. Riego manual en una cubierta vegetal en un edificio de oficinas sobre el río Támesis¹⁴. Fuente: autor.

¹⁴ Obra en la que participó el autor como parte de un proyecto de recuperación de la flora y fauna autóctona. Las necesidades de riego se extendieron durante los dos primeros años de establecimiento de la vegetación, pero se realizó de forma manual por no haber estado previsto inicialmente por parte de la ingeniería medioambiental.

La existencia de un riego adecuado permite contrarrestar las dificultades de crecimiento que los sustratos poco profundos imponen en la vegetación (Dunnnett & Nolan, 2004) (VanWoert, N. et al. 2005b).

De hecho, hay también muchos investigadores que afirman que para climas semiáridos el riego en las cubiertas extensivas, aquellas con espesores de sustrato reducidos, podría ser una necesidad, especialmente durante el primer o dos primeros años de establecimiento de las plantas y también durante períodos prolongados de sequía (Getter & Rowe, 2006) (Wolf & Lundholm, 2008).

Incluso, para cubiertas semi-intensivas con espesores bastante mayores, algunos autores también apuntan a la obligatoriedad de utilizar riego (Kotsiris et al., 2012), aunque su frecuencia e intensidad dependerán de muchos factores como el tipo de vegetación, tipo y espesor de sustrato o climatología concreta de la zona. Estas características serán las que habría que intentar optimizar, según los autores, para conseguir la mayor eficiencia hídrica posible, teniendo en cuenta que el agua es uno de los recursos naturales más escasos en estas regiones (Fioretti et al., 2010).

Puesto que tal y como afirman (VanWoert, N. et al. 2005a), el objetivo principal durante la fase de establecimiento de la vegetación es conseguir el 100% de cobertura vegetal tan rápido como sea posible para evitar el crecimiento de malas hierbas, reducir la posible erosión del sustrato por acción del viento o la lluvia y conseguir las cualidades estéticas deseadas, tal vez la aplicación de riego, aunque sea únicamente durante este primer período, puede ser necesaria.

Una vez las plantas están establecidas, la necesidad de riego puede no ser tan crítica y en todo caso dependerá de los factores enumerados anteriormente, tal y como concluyen (Benvenuti & Bacci, 2010). Bien es cierto, continúan los autores, que el horizonte temporal de la mayor parte de experimentos llevados a cabo hasta la fecha es muy corto y que sería crucial el poder analizar la evolución de la vegetación con y sin riego al cabo de varios años, como por ejemplo es el caso de los estudios conducidos por (Rowe et al. 2012).

Otro aspecto fundamental a la hora de evaluar ecológica y energéticamente las cubiertas vegetales sería la procedencia de la posible agua utilizada para el riego. Como se ha desarrollado en Capítulo V, el agua urbana y muy especialmente el agua potable para uso humano es muy intensiva en energía y recursos. Por lo tanto, cuando fuera posible se debería dar prioridad a la

utilización de otro tipo de aguas de menor calidad, tales como el agua de riego urbano, aguas pluviales, aguas grises recicladas o aguas salobres.

Sin embargo, la utilización de estas aguas de inferior calidad, no siempre es posible por su disponibilidad o por las condiciones de los propios edificios y además suponen la necesidad de utilizar exclusivamente vegetación resistente a los diferentes compuestos que contienen.

Por un lado, existen estudios como el presentado por Shirley-Smith (2006), que no sólo aprovechan las aguas grises para el riego de las cubiertas verdes, sino que a su vez, se sirven de la vegetación para realizar un filtrado del agua reciclada, mejorar su calidad final y destinarla a otros usos. En ese caso, aconsejan utilizar especies nativas perennes, con raíces de tipo dendrítico para alojar el mayor número de bacterias o con propiedades desinfectantes como la menta acuática (*Mentha aquatica*).

Por otro lado, investigadores como Schweitzer y Erell (2014), estudian la resistencia a la concentración de sales de varias especies candidatas a ser empleadas en cubiertas extensivas en el Mediterráneo, con resultados que se exponen más detalladamente en el apartado B de este Capítulo, encontrando buenos comportamientos en especies nativas propias de dunas y saladares. Para el caso de especies que no contaban con una predisposición natural a los suelos salobres, encontraron que el comportamiento de algunas plantas autóctonas era aceptable para contenidos medios de sales, mientras que la mortalidad era muy alta para grandes concentraciones.

Por tanto, parece claro que la utilización de aguas salobres o de menor calidad, obligan a una selección más exhaustiva de las especies vegetales para cubiertas y que la utilización de especies nativas propias de ecosistemas con altas concentraciones de sales reporta importantes beneficios en este sentido.

Respecto al mantenimiento de las cubiertas ecológicas, su intensidad y frecuencia vendrán marcadas por muchos factores. En primer lugar, como se ha desarrollado previamente, por el tipo de vegetación que contenga, que a su vez está altamente condicionado por el espesor de sustrato. Este es el motivo por el que las cubiertas con mayores espesores han permitido tradicionalmente el desarrollo de una mayor variedad de especies y en general a requerimientos de mantenimiento más altos, lo que ha dado lugar a la denominación de cubiertas intensivas (en mantenimiento).

Por el contrario las cubiertas extensivas engloban aquellas que prácticamente no requieren mantenimiento. En este caso, en la norma alemana se recomienda su inspección 1 o 2 veces al año, una vez la vegetación se ha establecido (FLL 2018).

El mantenimiento puede incluir la fertilización, retirada de especies indeseadas, relleno de huecos con nuevas plantas o esquejes, reemplazo de sustratos erosionados, podado de vegetación y limpieza de sumideros. Esta última función es especialmente importante ya que la acumulación de agua puede llevar a infecciones de las plantas por hongos y a su muerte (Dunnett & Kingsbury, 2004).

En relación al análisis de ciclo de vida y coste-beneficio de la inversión que suponen, las cubiertas verdes cuestan aproximadamente el doble de una azotea convencional, pero su vida útil es, según algunos autores, también el doble, 40 frente a 20 años debido al efecto de protección de las láminas impermeabilizantes que ejerce el sustrato (Getter & Rowe, 2006) (Feng et al., 2010) (Scholz-Barth, K. 2001) (Dvorak & Volder, 2012). Además en este cálculo habría que tener en cuenta su beneficios adicionales en términos de ahorro energético y por tanto económico (Getter & Rowe, 2006).

Por un lado, según algunos autores, el beneficio económico de las cubiertas vegetales extensivas a largo plazo compensa los mayores costes de instalación, incluso sin considerar el posible ahorro económico derivado de la menor demanda energética (Wong et al., 2003).

Por otro, estudios teóricos como el de Ascione, F. Bianco, N. de' Rossi, F. Turni, G. Vanoli, G. P (2013), calculan que el coste de riego necesario para cubiertas de *Sedum* o de gramíneas en localizaciones como Sevilla, 640 l/m²a y 1.1145 l/m²a, convertiría ambas soluciones en poco rentables económicamente.

Por último, si analizamos todas las etapas de vida de un edificio desde la producción de materiales y su transporte, hasta su final de vida, pasando por su fase de operación y mantenimiento, que es la que mayor impacto ambiental genera, podemos concluir que las azoteas vegetales son capaces de reducir muchos de estos impactos ambientales que previamente no se habían considerado en los análisis (Saiz Alcázar, S. Bass, B. 2006).

6.3.2.9 *Uso de fertilizantes*

El uso de fertilizantes y pesticidas debe ser especialmente controlado, sobre todo si la calidad del agua de escorrentía es un factor importante. En caso de ser necesario, se recomiendan fertilizantes NPK de lenta disipación en dosis de 5 g*m⁻² de N (FLL 2018).

Sin embargo, algunos autores como (Getter & Rowe, 2006) defienden que unos niveles de materia orgánica demasiado altos o el uso de fertilizantes añadidos al sustrato podría conducir a sustratos excesivamente fértiles, que a su vez generarán un crecimiento muy rápido y excesivo de la vegetación. Este hecho aumentaría su exposición a la sequía durante los períodos de verano, puesto que las plantas con una biomasa más reducida son capaces de superar mejor las condiciones de déficit hídrico (Kotsiris et al., 2012) (Nagase et al., 2010).

Por otro lado, varios experimentos concluyen que sustratos con bajo o medio grado de fertilización podrían favorecer el crecimiento de especies más diversas reduciendo la dominación de las especies más agresivas. Por tanto, lo más interesante sería encontrar los mínimos niveles de compost y de fertilizantes que permitan la vida de las plantas, mientras se reduce el riesgo de producir contaminación por N, P y otros nutrientes (Dunnnett & Kingsbury, 2004).

6.3.2.10 *Método de instalación*

Las cubiertas verdes basan su funcionamiento en la presencia de vegetación correctamente establecida y adaptada a unas condiciones microclimáticas muy severas. Es por tanto, que el método de instalación y la fase de establecimiento van a marcar notablemente el éxito de estas soluciones. Existen actualmente en el mercado dos métodos principales:

1. Semillas/brotos, cepellones o esquejes que se siembran directos en el sustrato.

2. Plantas pre-cultivadas en forma de bandejas o alfombras que se colocan directamente en la cubierta produciendo instantáneamente un 100% de cobertura.

Los investigadores Klein y Coffman (2015), tras un estudio en una cubierta real en Oklahoma, concluyen que la plantación de semillas es una alternativa válida a los esquejes o plantas de cepellones pequeños, especialmente para el caso de algunas plantas nativas. Según los autores, al colocar plantas en cepellones, se

debe tener en cuenta la especie, la profundidad y tipo de sustrato y la disponibilidad de agua, a la hora de determinar la densidad para obtener la cobertura en el tiempo deseado.



Figura 6.08. Bandejas de alveolos con cepellones de diversas especies provenientes de vivero para su trasplante a las cubiertas experimentales. Fuente: autor.

Por su parte, Vidal et al. (2010), abogan por la utilización de sistemas pre-cultivados en bandejas con el fin de evitar uno de los principales problemas de los métodos de plantación in-situ, que es la lentitud de crecimiento. Afirman los investigadores que los sistemas convencionales pueden emplear hasta tres o más años y altas dosis de mantenimiento hasta conseguir un comportamiento adecuado.

Otra opción es la colonización espontánea, en la que se instala el sustrato y se deja que especies locales colonicen la cubierta, aunque los resultados estéticos sean más cuestionables (Getter & Rowe, 2006).

Independientemente del método de instalación, al menos para zonas templadas, las mejores épocas para la plantación son la primavera y el otoño, algo que puede variar según el clima de cada zona. En función de su localización, su instalación durante el verano requerirá riego adicional y posiblemente elementos de sombra protectores (Getter & Rowe, 2006).

En cualquier caso, está sobradamente demostrado que se requerirá riego inmediatamente después de la colocación y su duración en semanas, o su necesidad permanente, dependerá del clima, especies, composición y profundidad del sustrato y estética perseguida (Getter & Rowe, 2006).

6.3.3 Revisión bibliográfica selección vegetal

Aunque no son muchos los estudios en los que se vincula la elección de una vegetación idónea para las cubiertas verdes con el ahorro energético y el consumo de agua para su supervivencia en zonas cálidas y semi-áridas, como se ha comentado previamente, sí existen varios autores que total o parcialmente han realizado experimentos con especies vegetales que se podrían adaptar a las condiciones de una azotea ecológica en el Mediterráneo.

Sin embargo, el propósito de esta revisión bibliográfica no es específicamente el de encontrar especies vegetales óptimas para su utilización en experimentos en la Región de Murcia, puesto que se pretende encontrar flora autóctona válida para este propósito, sino identificar aquellas características que han contribuido a resultados positivos en localizaciones similares.

Por consiguiente, de las especies vegetales seleccionadas por otros autores, se evalúan rasgos como la estética, velocidad de establecimiento, dirección de propagación, longevidad, resistencia a plagas y enfermedades, tolerancia a la salinidad y a la sequía, preferencias en la composición de sustrato, consumo de agua y capacidad para proyectar sombras y refrescar.

En primer lugar, uno de los estudios más completos al respecto, es el llevado a cabo en Israel por Schweitzer y Erell (2014). En él evalúan, a través de maquetas de edificios a escala reducida, el ahorro energético, consumo de agua y capacidad de supervivencia de cuatro especies vegetales. En el Capítulo VII se desarrolla con mayor profundidad la relación entre el gasto de agua y el potencial ahorro energético que los autores declaran con el uso de esta vegetación, pero las características de las especies elegidas se describen a continuación.

En primer lugar, *Pennisetum clandestinum*, llamado también en castellano césped kikuyu, o quicuyo, es una herbácea de la familia de las poáceas originaria de las regiones tropicales del este de África, utilizada de forma muy común en jardines costeros como alternativa al césped convencional, por su tolerancia al

pisoteo y una vez establecida a la sequía prolongada. Crece formando una tupida trama de tallos y posee una potente red de raíces muy densas con un crecimiento rápido y agresivo, lo que le permite dominar y excluir a todas las demás especies vegetales presentes en la zona. Adaptable a todo tipo de suelo, pero especialmente a los que tienen buen drenaje como los arenosos, no tolera el sombreado y requiere de ambientes cálidos. Presenta por tanto unas cualidades particularmente adaptadas a las condiciones de las cubiertas vegetales, pero es sin embargo una especie catalogada en España como invasora, especialmente en ecosistemas costeros y dunas, por lo que se debe evitar su utilización (Schweitzer & Erell, 2014) (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2013).

La segunda especie, *Aptenia cordifolia*, llamada vulgarmente Rocío, es una planta herbácea perenne de la familia Aizoaceae (Aizoáceas), proveniente en origen de Sudáfrica, pero naturalizada en muchas zonas del Mediterráneo, donde se cultiva como ornamental o para fijar taludes. Presenta hojas planas de tipo suculento que generan una cobertura muy densa, lo que propicia una sustancial reducción de temperatura del sustrato inferior. Además, su crecimiento horizontal vigoroso a través de tallos que tienen capacidad de enraizar y su resistencia a los extremos de temperatura, sequía prolongada y moderada salinidad, la convierten en una buena candidata para su implantación en cubiertas verdes monocultivares, puesto que compite activamente con el resto de vegetación impidiendo su desarrollo (Schweitzer & Erell, 2014) (Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge, 2006).

Por otro lado, la especie *Sesuvium verrucosum* es otra herbácea perenne de la familia Aizoaceae, también de carácter suculento, recomendada para ornamentación, fijación de dunas y mitigación de la desertificación. Presenta una alta capacidad de regeneración tras sequías prolongadas y tolera una alta salinidad, aunque los autores sólo la recomiendan en situaciones con aguas de baja calidad y sustratos con sales, puesto que su comportamiento en relación al ahorro energético no es demasiado prometedor (Schweitzer & Erell, 2014) (United States Department of Agriculture 2020).

Por último, el *Halimione portulacoides* es una especie halófila crasa que se halla principalmente en saladares y dunas. Se trata también de una arbustiva con gran capacidad tapizante y extremadamente tolerante a los suelos salinos y fuertemente oxidados. Sin embargo su contribución a la mitigación de

temperaturas no era muy importante, según los autores, por lo que al igual que el *Sesuvium*, sólo lo recomiendan para casos con alta presencia de sales en el agua o en el sustrato (Schweitzer & Erell, 2014) (Espinar, J. L. 2009).

Por su parte, otros investigadores como Pisello, A. Piselli, C. Cotana, F. (2015) emplean la arbustiva y aromática *Helichrysum italicum*, en su estudio de cubiertas verdes-frías (cool-green roofs). Sus hojas y flores presentan un color claro, gris plateado y fue seleccionada por sus propiedades físicas, que combinan dos de las cualidades necesarias según sus hipótesis: vegetación que produzca mucha sombra y partes aéreas de color claro para reflejar la luz. Es una planta que necesita crecer en exposición muy soleada, no requiere mucho mantenimiento y según los autores, potencialmente ningún riego, al menos en áreas templadas como Perugia.



Figura 6.09. Ejemplar de *Helichrysum (stoechas)* en floración en la sierra de Ricote. Fuente: autor.

Se trata además de una planta con subespecies presentes en todo el Mediterráneo, y común en la Región de Murcia y el litoral mediterráneo español, con mayor frecuencia por la mitad sur de la región y sus valles cálidos, por lo que representa una buena candidata para su uso en las cubiertas vegetales en zonas cálidas.

En otro estudio, Karachaliou et al. (2015), también utilizan varias plantas aromáticas autóctonas de bajo riego en una cubierta de 10.000 m² en Atenas, concluyendo también que aquellas plantas con colores más claros como el *Helichrysum italicum*, por su baja absorción de la radiación solar y con follaje más denso generan una temperatura superficial muy inferior a plantas con colores más oscuros y menos follaje.

Una de las especies más empleadas en las cubiertas vegetales, especialmente en las extensivas, es el *Sedum*, con una amplia variedad de sub-especies. Por ejemplo, Bevilacqua et al. (2015), emplearon para sus experimentos una combinación de *Sedum album*, *rupestre*, *moranense*, *spurium*, *sediforme*, *acre* y *album coral carpet*, pero sólo consiguieron durante el primer año un ratio de cobertura del 10% y el máximo alcanzado fue el tercer año con del 80%, por lo que aparecieron gran número de plantas anuales colonizadoras que competían por el espacio.

En el caso de Kotsiris, et al. (2013), realizaron un experimento con probetas que simulaban dos cubiertas verdes en Atenas con 30 y 40 cm. de profundidad respectivamente en las que plantaron ejemplares de *Pittosporum tobira* y *Olea europaea*. De acuerdo a los resultados de su estudio, ambas especies obtuvieron crecimientos satisfactorios para los dos espesores de sustrato estudiados, pero en ambos casos mediante la utilización de un riego algo elevado, equivalente a 3,8 l/m²d.

En un estudio previo, Kotsiris et al. (2012) habían ya realizado otro experimento en Atenas con la especie *Lavandula angustifolia* donde habían sido capaces de obtener un buen resultado de desarrollo de la vegetación con aporte de agua de riego equivalente a 650 l/m²a, es decir, 1,78 l/m²d.

Por su parte Ntoulas et al. (2013), emplean *Zoysia matrella* que en sus pruebas en la Universidad de Atenas y Nardini et al. (2012), realizan una serie de experimentos con dos variedades arbustivas, *Cotinus coggygria* L. y *Prunus mahaleb* L. en su investigación en la Universidad de Trieste.

6.3.4 Elección para nuestro experimento

Tal y como se ha desarrollado en el Capítulo de Metodología, una vez revisados los parámetros a tener en consideración para la fijación de variables que permitirán llevar a cabo los experimentos de campo que integran esta investigación, se describen a continuación los valores adoptados.

En primer lugar, se opta por emplear un modelo de cubierta verde que podría calificarse como semi-extensiva, según la nomenclatura más extendida, por combinar un mantenimiento muy limitado con unas posibilidades vegetales algo mayores que las extensivas tradicionales, como ya aconsejaban diversos

autores (Ntoulas et al., 2013), (Kotsiris et al., 2012), (Dunnett & Nolan, 2004) (Kotsiris et al., 2013).

Además, con la intención de acotar un rango de aplicabilidad de esta solución, se establecen dentro de los experimentos dos subtipos de cubierta, con espesores distintos que representan dos escenarios habituales: rehabilitación de edificios existentes y obras de nueva planta.

6.3.4.1 Rehabilitación de edificios existentes

En primer lugar, para el caso de rehabilitación de una cubierta transitable que se transformara en vegetal extensiva, y por tanto no transitable, se selecciona la carga máxima que se podría introducir. A este respecto y dada la enorme variabilidad constructiva que se puede encontrar en edificios existentes, el cálculo se realiza bajo los supuestos de eliminación de las capas de pavimento e impermeabilización existentes en el caso de terrazas transitables no ventiladas y adicionalmente de toda la subestructura de ventilación en aquellas construidas “a la catalana”. En la rehabilitación se acometería una nueva impermeabilización como parte de la instalación del sistema de cubierta.

Puesto que la normativa ha ido evolucionando desde las normas M. V. 101-1962 y su modificación posterior NBE AE-88 de Acciones en la Edificación hasta la entrada en vigor del DBSE-AE del Código Técnico de Edificación, la situación de las edificaciones existentes es muy dispar, en consonancia con los requerimientos estructurales que establecían estas normas en sus épocas correspondientes. En el caso de la carga muerta que se eliminaría de una azotea existente para la instalación de una cubierta vegetal, los valores varían desde un mínimo de 50 Kg/m² para el caso más desfavorable de baldosa hidráulica o cerámica con un grueso total, incluso relleno, de 3 cm., que establecen las normas, hasta los 80 Kg/m² en el caso de un terrazo sobre mortero, de 5 cm. espesor, incluyendo el relleno.

Adicionalmente, ya desde 1941, con la aprobación del Decreto sobre las restricciones del hierro en la edificación se establecía una sobrecarga de uso en todas las azoteas, al menos en edificios que utilizasen hierro, de 150 Kg/m² que posteriormente las Normas M. V. 101-1962 y AE88, rebajarían a 100 Kg/m² en aquellas que se destinasen sólo para conservación. Posteriormente el DBSE-AE

rebajó a 1 KN/m² la sobrecarga repartida, aunque introduciendo la exigencia de resistir 2 KN. de carga concentrada.

Por consiguiente, con estos datos se puede inferir que para los casos de rehabilitación de azoteas aquí contemplados, sería razonable asumir que, para el caso más desfavorable, el peso adicional de la cubierta vegetal a añadir podría situarse alrededor de los 100 Kg/m² sin producir un estrés significativo a la estructura existente.

En términos de espesor equivalente, si tomamos los datos que aportan diversos autores de las propiedades físicas de los sustratos, particularmente su densidad en saturación, podemos establecer un umbral mínimo alrededor de los 7,5 cm. de espesor, que equivaldrían a 94,1 Kg/m² en saturación, para el caso específico del sustrato seleccionado. Bien es cierto que sería necesario considerar también el peso de los demás elementos que componen la cubierta, aunque como se ha comentado previamente, su porcentaje es muy limitado respecto al del propio sustrato.

Propiedades físicas de sustratos	Densidad en Seco kg/m ³	Densidad en Saturación kg/m ³	WHC (capacidad de retención de agua)
Farrell, C. et al. (2013)	-	1260	45.9%
	-	1560	44,0%
	-	1110	51.7%
Razzaghmanesh, M. et al. (2014)	1050	-	44,0%
	1150	-	41,0%
Kotsiris, G. et al. (2013)	650	1140	44,0%
	780	1210	43,0%
	670	1220	53,0%
Getter, K. Rowe, B. (2007)	1370		16.0%
Nektarios, P. (2011)	769	1255	44,3%
Nektarios, P. (2015)	790	1280	49,0%
	770	1260	44.3%
Ntoulas, N. (2013)	806	1280	45,0%
	824	1320	46,0%
	868	1350	44,0%
	876	1380	45,0%

Tabla 6.02. Propiedades físicas de diversos sustratos empleados en la literatura científica. Fuente elaboración propia a partir de los datos recogidos de los distintos autores.

En el caso de que se tratase originalmente de cubiertas no transitables con protección pesada de gravas o equivalente, este espesor de sustrato podría ser sensiblemente mayor, al tener una inicial capacidad de carga muy superior, debido al peso propio de esta protección mineral, que se aproxima a los 200 Kg/m² según la norma y que sería retirada al acometer la rehabilitación.

6.3.4.2 Obras de nueva planta

De manera análoga, para el supuesto de obras de nueva planta, en función de la literatura científica consultada y revisada en apartados previos, se fija un espesor máximo de sustrato de 15 cm., que resultarían en una carga añadida de 188,2 Kg/m² en saturación, siempre por debajo de las sobrecargas habituales en construcción nueva.

Además, el utilizar espesores de sustrato que sean múltiplos entre sí, podría ser útil a la hora de establecer comparativas de rendimiento energético e hídrico, y también permitirá una evaluación de la respuesta de las mismas especies vegetales en dos situaciones espaciales muy distintas.

Respecto a la inclinación de las probetas experimentales, se decide optar por unas cubiertas simuladas sin inclinación, puesto que las diferencias de comportamiento citadas en la literatura no son muy acusadas. Adicionalmente, las inclinadas permiten menor número de especies y las azoteas vegetales planas son con diferencia las más habituales.

En la elección del tipo de sustrato se han considerado las características más relevantes con que debe contar un medio de crecimiento como son principalmente una baja densidad, mínima compactibilidad, alta permeabilidad, estructura físico-química estable, alta capacidad de retención de agua, baja proporción de materia orgánica y por otro lado que haya sido demostrado que favorece el correcto crecimiento de la vegetación.

Para ello, se decide optar por un tipo de sustrato probado en 2 fases experimentales distintas y con diferentes especies vegetales en Atenas por Nektarios et al. (2011) y Nektarios et al. (2015) con resultados satisfactorios con bajos índices de riego. Para mejorar adicionalmente la capacidad de retención de agua del sustrato y por tanto la teórica resistencia a la sequía de la vegetación, se incluye un pequeño porcentaje de hidrogel, según las recomendaciones de otros

experimentos realizados en el Mediterráneo (Savi et al., 2014) o en zonas cálidas de Australia (Farrell et al., 2013).

La composición volumétrica final del sustrato es la siguiente: 40% minerales de baja densidad, 20% perlita, 20% compost, 15% finos (arena y arcilla), 5% zeolita al que se añade un 0.2% de hidrogel.

Por otro lado, en cuanto al resto de capas que compondrán las cubiertas experimentales, se recurre a seleccionar entre los sistemas comerciales estudiados, aquellas alternativas disponibles localmente con mayor capacidad de retención de agua. Finalmente se selecciona la capa de drenaje Diadrain 40 de Diadem, que permite almacenar hasta 19,59 l/m², por un peso propio de sólo 1,96 Kg/m², puesto está demostrado que las bandejas drenantes-retenedoras tienen un comportamiento mejor que el drenaje de material suelto y además su peso es muy inferior (Savi, T. Andri, S. Nardini, A., 2013).



Figura 6.10. Capa de drenaje (izq.) Diadrain 40 y retenedora de agua VLS-500 (der.) de la marca Diadem. Fuente: autor.

Bajo la capa drenante, se sitúa un fieltro técnico de protección y retención de agua VLS-500 de Diadem, con una capacidad de albergar hasta 3,6 l/m² con un peso en seco de 500 g/m². El efecto positivo de la utilización de estas láminas de retención de agua está respaldado por autores como Savi et al. (2013). En un estudio con varias configuraciones de cubierta en Trieste, demostraron que mejoraba la cantidad de humedad disponible y por tanto la resistencia a la sequía de la vegetación, consiguiendo que el 90% del agua que acumulaba fuera utilizada por las plantas.

En cuanto al marco de plantación de las especies vegetales, como se ha mencionado en el Capítulo de Metodología, también se decide en base a la experiencia previa de otras investigaciones comparables.

Estudios como el de Dvorak y Volder (2012), en Texas emplean módulos experimentales de 60x60 cm. donde instalaron 9 esquejes de especies vegetales de tipo suculento con una separación de 10 cm. a los bordes y 20 cm. entre plantas consiguiendo un óptimo comportamiento térmico y una supervivencia del 100% en alguna de las especies utilizadas.

Del mismo modo, (Ntoulas et al., 2013) en un estudio experimental en Atenas, establecieron una distancia de separación de 20 cm. entre cepellones de la especie *zoysia matrella L.* y 10 cm. a los bordes de las probetas, que en este caso eran de 80x100 cm. A pesar de la escasa distancia de plantación, los autores reportaron una cobertura vegetal de sólo entre el 62 y 90% durante el primer año y dificultades para conseguir una cobertura total durante el segundo.

En otros experimentos de campo, como el desarrollado por (Nektarios et al., 2015) en Atenas, se emplearon probetas de 60x58 cm., donde se plantaron 9 esquejes de otra especie suculenta nativa, manteniendo una separación de 15 cm. entre plantas y consiguiendo una óptima cobertura y establecimiento durante los dos primeros años.

En cambio, autores como Kotsiris et al. (2013), establecen marcos de plantación más amplios, de hasta 60cm, aunque se trata del caso de plantas de mayor porte, como *Pittosporum tobira* y *Olea europaea*.

En nuestro caso, a pesar de que algunas de las especies que se han seleccionado, requieren teóricamente mayor espacio de plantación para alcanzar su desarrollo completo, el reducido espesor de sustrato empleado, supondrá igualmente un freno a su total desarrollo, por lo que se decide utilizar una distancia de 20 cm. entre todas las especies, con el fin de conseguir un buen ratio de cobertura desde el primer año, teniendo en cuenta la corta duración en el tiempo de esta investigación.

Para el caso de una cubierta real, se aconseja estudiar específicamente el marco de plantación óptimo de cada especie con el fin de obtener una correcta cobertura a la vez que se permite el desarrollo completo de la vegetación.

Por último, respecto a la elección del material vegetal a emplear, se opta por el empleo de especies nativas de la Región de Murcia por considerar, tal y como se ha desarrollado previamente, que la vegetación autóctona se encuentra más adaptada a las condiciones climáticas particularmente duras que se podrían dar en las cubiertas vegetales en el Mediterráneo, afirmación que viene respaldada por numerosos autores (Van Mechelen et al., 2014). (Dvorak & Volder, 2012), (Klein & Coffman, 2015), (Provenzano et al. 2010).

Del mismo modo, se decide utilizar una mezcla de especies vegetales, tal y como aconsejan numerosos trabajos científicos (Dvorak & Volder, 2012), (Dunnett & Kingsbury, 2004), (Van Mechelen et al., 2014) (Wolf & Lundholm, 2008), por aportar una mayor biodiversidad y un alto valor estético con distintas formas y épocas de floración, a la vez que aumenta la viabilidad ecológica de la cubierta.

Por tanto, tal y como se desarrolla en el Capítulo de Metodología, se eligen siguiendo el Atlas de los paisajes de la Región de Murcia (Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio, 2009) varias localizaciones de la Región de Murcia, situadas en diferentes pisos de vegetación y en combinación con la literatura científica específica de azoteas ajardinadas y de botánica regional, se realiza una pre-selección de especies candidatas a formar parte de la fase experimental¹⁵.

¹⁵ Para más información sobre el proceso de selección de especies vegetales autóctonas a través de visitas de campo, consultar el Anexo 1.

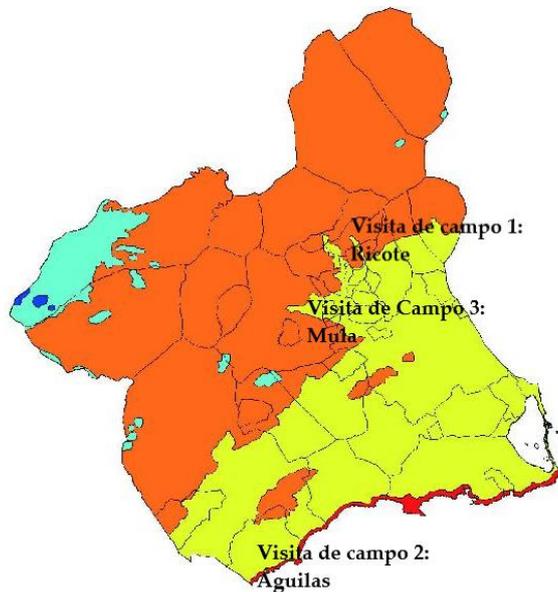


Figura 6.11. Mapa de las visitas de campo realizadas en la Región de Murcia durante los meses de marzo y abril de 2017. Fuente: autor a partir de fuente citada¹⁶.



Figura 6.12. Piso de Meseta (Mesomediterráneo cálido)¹⁷: cobertura de matorral xerófilo en las sierras y pasillos subbéticos de Ricote. Visita de campo realizada el 26/03/2017.

¹⁶ Mapa de Pisos Bioclimáticos del *Atlas de la Región de Murcia*. Consultado en marzo de 2017 en: <https://www.atlasdemurcia.com/index.php/secciones/10/flora-vascular-y-vegetacion/4/index.h>

¹⁷ Clasificación según: Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*, pp.9-11.



Figura 6.13. Piso Litoral (termomediterráneo inferior)¹⁸: Vegetación arbustiva y de matorral mediterráneo en el Cuartel del Ciscar, perteneciente a las sierras litorales del Lomo de Bas – Rambla de las Moreras. Visita de campo realizada el 02/04/2017.



Figura 6.14. Piso Sublitoral (Termomediterráneo superior)¹⁹: matorrales xerófilos en un paisaje característico de barrancos y ramblas de margas y areniscas en la cuenca del río Pliego cerca de Mula. Visita de campo realizada el 03/04/2017.

¹⁸ Clasificación según: Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*, pp.9-11.

¹⁹ (ibídem).

6.3.4.3 Especies seleccionadas²⁰

Finalmente, se escoge para la fase experimental inicial, correspondiente al año 2017, las siguientes especies autóctonas por considerar que sus parámetros fisiológicos y estéticos son los más adecuados al propósito de este estudio:

- *Lygeum Spartum* o Albardín (viveros Muzalé)²¹
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino (viveros Muzalé)
- *Thymus zygis sub. Sylvestris* o Tomillo fino (viveros Muzalé)
- *Helichrysum stoechas* o Siempreviva (viveros Muzalé)
- *Ephedra fragilis* o Efedra (viveros Muzalé)
- *Rosmarinus eriocalix* o Romero blanco (viveros Muzalé)

En una segunda etapa, referida a la replantación de las probetas en el otoño de 2017, se decide emplear nuevamente algunas de las especies del primer experimento, por los buenos resultados obtenidos, y sustituir otras que por diversos motivos no se habían desarrollado satisfactoriamente. La combinación final de especies para la segunda fase es la siguiente:

- *Lygeum Spartum* o Albardín (viveros Muzalé)
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino (viveros Muzalé)
- *Thymus zygis sub. Sylvestris* o Tomillo fino (recogida silvestre controlada en Prov. Albacete)²²
- *Salvia lavandulifolia* (recogida silvestre controlada en Prov. Albacete)
- *Asteriscus maritimus* (viveros Muzalé)
- *Brachypodium retusum* (viveros Muzalé)

²⁰ La descripción y características de cada una de las especies empleadas se pueden consultar en el Anexo 2.

²¹ Los ejemplares del primer experimento proceden del productor de planta autóctona ubicado en la Rambla de Muzalé, Abanilla, Murcia. <https://www.viverosmuzale.com/>

²² Para más información sobre la recolección, consultar Anexo 2.

**VII – ESTUDIO
CUANTITATIVO: ENERGÍA
Y AGUA**

VII - ESTUDIO CUANTITATIVO: ENERGÍA Y AGUA

Como se ha comentado, el objetivo principal de este trabajo es dilucidar si las cubriciones vegetales aportan a los edificios y su entorno beneficios cuantificables en términos de energía, independientemente de otras consideraciones cualitativas que pudieran ser relevantes.

Un gran número de investigaciones llevadas a cabo en diferentes países y climas, entre ellas algunas en climas cálidos, atribuyen a estas cubiertas múltiples beneficios: la mejora del confort interior y exterior de los edificios, la capacidad de amortiguar y reducir la descarga de agua a las redes, la filtración de la polución ambiental, el aumento de la biodiversidad o la reducción del ruido y del efecto isla de calor de las ciudades, tal y como se desarrolló en el Capítulo I de este trabajo.

Sin embargo, el hecho de que estas soluciones dependan de un elemento vivo como la vegetación, que tiene su desarrollo y supervivencia condicionado a su vez por el clima y la pluviometría, ha generado dudas respecto a su utilización (Bevilacqua et al., 2015)²³

Consecuentemente, para regiones como la semi-árida Mediterránea, con menor disponibilidad o periodicidad de agua de lluvia, será necesario establecer si estas cubiertas, consideradas aisladamente como beneficiosas en términos de energía, suponen o no un aumento global del consumo energético, ya que la necesidad de mantenimiento y riego artificial podría existir e incluso llegar a ser muy alta (Ascione et al., 2013) con el consiguiente gasto energético asociado. Este punto es algo que en muchas ocasiones, tanto la literatura científica, como las soluciones comerciales disponibles en el mercado parecen pasar por alto y que sin embargo es fundamental en algunas regiones del planeta (Schweitzer & Erell, 2014).

²³ Los autores argumentan que a menos que la capa vegetal se instale completamente desarrollada, no se puede garantizar que la cobertura de la vegetación sea completa y colabore activamente a la mitigación climática.

Según la revisión bibliográfica realizada y según declaraciones de autores consultados como Schweitzer y Erell (2014), se puede afirmar que los estudios que relacionan la eficiencia energética con el consumo de agua de este tipo de cubiertas son muy escasos y parciales.

Por tanto, a partir de la clasificación propuesta para cubiertas vegetales idóneas para el clima Mediterráneo semi-árido, se evalúan a continuación los dos factores que según varios de estos autores (Zinzi & Agnoli, 2012) (Ascione et al., 2013), tienen más influencia en su resultado energético global: las reducciones en las demandas directas de climatización y su consumo de agua para riego traducido a consumo de energía.

7.1 AHORRO DE ENERGÍA

Durante los períodos cálidos, el ahorro de energía para los edificios que supone el uso de cubiertas verdes es indiscutible según la mayoría de estudios realizados hasta la fecha. Esta mejora procede esencialmente del sombreado y evapotranspiración generados por las plantas, que ayudan a reducir la temperatura superficial (Ascione et al., 2013) (Gagliano et al. 2014) (Fioretti et al., 2010).

Más concretamente, Schweitzer y Erell (2014), comprobaron que el efecto de la evaporación de agua es mucho menos efectivo como mecanismo de refrescamiento pasivo sin la existencia de la sombra generada por las plantas.

También la inercia térmica adicional que aporta el sustrato y el agua retenida juegan un papel importante en determinadas situaciones, aumentando el retraso térmico o time lag entre interior y exterior, moderando los picos de temperatura interior. Todos estos factores generan un descenso de las ganancias de calor a través de la cubierta durante el verano con respecto a una cubrición tradicional (Fioretti et al. 2010).

Desde el punto de vista físico, las cargas térmicas debidas a la radiación solar y a la temperatura del aire exterior se ven reducidas antes de entrar en el edificio por la capa de cubrición vegetal (Kumar & Kaushik, 2005) (Palomo del Barrio, 1998) que actúan como protección de la cubierta. Este fenómeno depende de la absorción por parte de las plantas de parte de la radiación solar para llevar a cabo sus funciones vitales: fotosíntesis, evapo-transpiración y respiración.

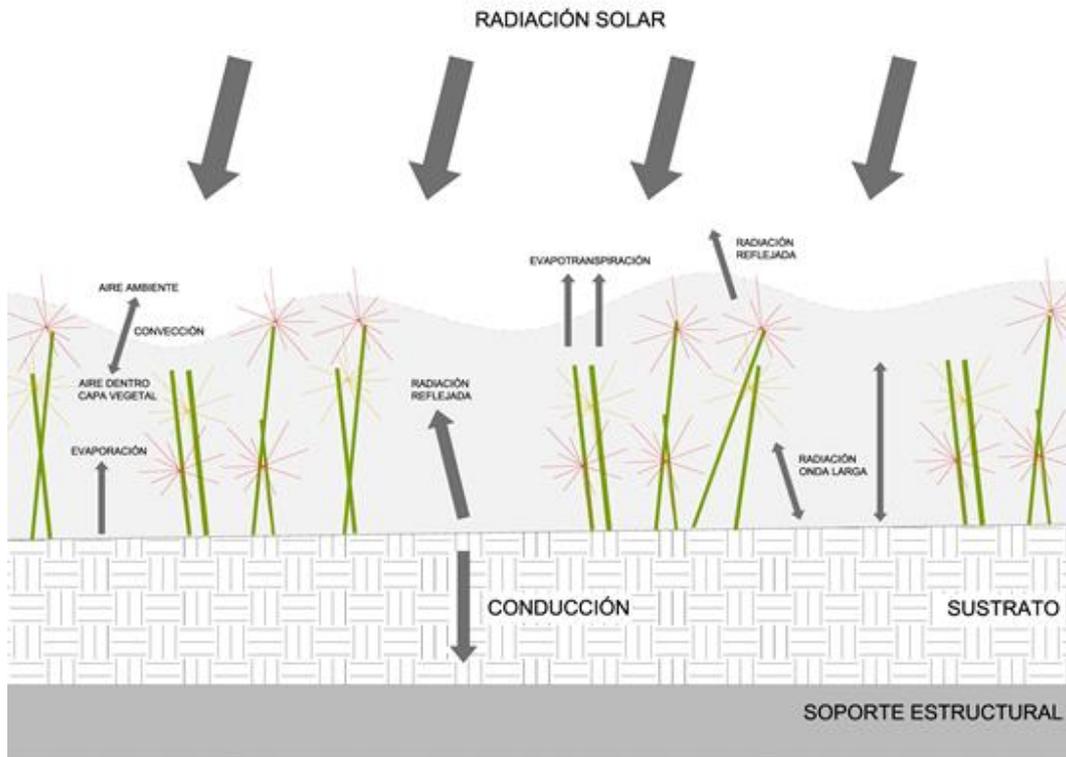


Figura 7.01. Esquema del balance térmico de una cubierta verde. Fuente: elaboración propia a partir de Leonard, T. y Leonard, J. (2006), Sailor, D.J. (2008), Refahi y Talkhabi (2015).

La presencia y características de la vegetación afectan además al balance energético de la cubierta de varias formas. Por un lado, provee sombreado al sustrato reduciendo la radiación captada por el mismo, al tiempo que limita su factor de visión del cielo y por tanto su emisión de radiación de onda larga. Por otro, protege el sustrato del viento, reduciendo las transferencias de calor por convección. Por último, la vegetación produce transpiración, generando refrescamiento evaporativo en su entorno (Zinzi & Agnoli, 2012) (Palomo del Barrio, 1998) (Sailor, D.J. 2008) (Lee et al., 2007).

Es por ello que la elección del tipo de vegetación es fundamental en el comportamiento energético de este tipo de soluciones. Como se ha evaluado anteriormente, el color, forma de las hojas, altura, capacidad de cubrición, etc. juegan un papel muy importante en su comportamiento físico como amortiguador de la transmisión de energía.

7.1.1 Color y forma de la vegetación

Según autores como Theodosiou (2003), el factor más influyente en la eficiencia de las cubriciones verdes en términos de energía es la densidad y factor de forma de la vegetación, lo que se traduce numéricamente en el índice de área de las hojas o Leaf Area Index (LAI), mientras que según el modelo matemático que plantea este autor, el espesor del sustrato tiene poca relevancia.

En esa misma línea, la mayoría de investigadores no atribuyen los posibles beneficios de los sistemas de cubierta al espesor del sustrato, sino a su composición y especialmente a su contenido de humedad, al margen de las mejoras que la vegetación pueda aportar. Varios de los estudios mencionados anteriormente evalúan cómo el rendimiento térmico de las azoteas vegetales está altamente condicionado por la cantidad de agua presente en el sustrato.

Por un lado, Lee et al. (2007) afirman que las características del sustrato, incluyendo su contenido de humedad, pueden hacer variar el valor de transmitancia térmica de la cubierta en un rango de hasta 20 veces, con lo que su eficiencia energética se vería muy alterada.

Por otro, investigaciones como la llevada a cabo por Bevilaqua et al. (2015) refuerzan esta teoría. En un estudio que realizaron en la ciudad de Lérida, España, evaluaron la influencia del ratio de cobertura de la vegetación en la eficiencia energética de una azotea verde con modelos a escala real y encontraron que durante el primer año el ratio de cobertura fue únicamente del 10%, mientras que el tercer año alcanzó el 80% pero la variación en la eficiencia energética del conjunto no se correspondía con estos datos y concluyeron por tanto que está más influenciada por la presencia de agua en el sustrato.

Es más, autores como Zinzi y Agnoli (2012) realizaron un estudio del impacto del contenido de agua en el comportamiento térmico de una azotea verde y comprueban que estos valores tienen una relación directa. Un sustrato con un adecuado contenido de agua tendrá un buen comportamiento como refrescamiento pasivo durante el verano. Sin embargo, en las zonas Mediterráneas, especialmente en el centro y sur, no se puede sólo confiar en las precipitaciones, puesto que en ese caso no hay garantías de que el sistema funcione correctamente, por lo que se prevé necesario un riego adicional.

En su investigación, aunque puramente teórica, encontraron que en localidades como Palermo una cubierta que sólo obtenga humedad de las precipitaciones, el ahorro energético anual total sería del 11%. Sin embargo, este valor se debe únicamente a la disminución del 20% que se produce en invierno, puesto que en verano la reducción de la demanda sería cero por efecto de la vegetación seca y de la falta de humedad del sustrato, lo que inhibe los beneficios de la evapotranspiración.

En cambio, para el caso de un sustrato que se mantenga artificialmente saturado en la misma ubicación, los valores de ahorro energético podrían alcanzar el 24% anual, con unos valores para el invierno muy similares a la misma cubierta sin saturar, pero con un descenso de hasta el 50% en verano.

En su estudio, comparan distintas ciudades como Palermo, Barcelona y El Cairo, que tienen diferentes comportamientos en el caso de sustrato seco o saturado, en función de si en esa ubicación tiene mayor importancia la calefacción, caso de Barcelona, la refrigeración, como El Cairo, o si ambas son similares, tal y como ocurre en Palermo (Zinzi & Agnoli, 2012).

Para el período de invierno, se observa que las cubiertas vegetales más secas mejoran en todos los escenarios el comportamiento térmico del edificio, precisamente debido a este contenido limitado de agua, lo que disminuye la transmitancia térmica del sustrato. Por tanto, añaden los autores, se pone de manifiesto la importancia de la estrategia de riego durante todo el año, no sólo para el período de verano y el aporte de agua debe ser calibrado de acuerdo a las condiciones climáticas del momento (Zinzi & Agnoli, 2012).

La conclusión que se puede extraer de este estudio para una localización como la Región de Murcia y sus equivalentes, es que, para la época de verano, siempre se comporta mejor el sustrato saturado, mientras que durante la estación más fría no es particularmente beneficiosa la presencia de humedad en el sustrato, más allá de la que aporten las precipitaciones, siempre y cuando la vegetación obtenga suficiente agua para su desarrollo.

En la misma línea, Feng et al. (2010), en un experimento en Guangzhou, en la Universidad del Sur de China, concluyeron que un riego adecuado durante el verano podría constituir una manera muy efectiva para mejorar el comportamiento térmico de estas cubiertas en zonas cálidas.

Por su parte, autores como Ascione et al. (2013), emplean un método de cálculo que parte de la base de maximizar la evapotranspiración y por tanto se centra en accionar el riego en aquellos momentos en que la temperatura exterior sea tal que lleve a beneficios energéticos en el interior del edificio. Por tanto, siendo ésta una premisa válida para intentar minimizar la transmisión de energía al edificio durante el verano y de paso la mejor para reducir la temperatura a escala de ciudad, no tiene en cuenta que el agua es un bien escaso en muchos lugares y por tanto su uso más efectivo para la vegetación sería en las horas de mínima evaporación.

Por tanto, una estrategia de riego más sensible a priori, parecería la de utilizar durante la noche el riego mínimo para mantener las plantas en buen estado y durante el día hacer uso únicamente de la sombra de la vegetación y la inercia de los sustratos como estrategia para reducir las ganancias por radiación y conducción.

Sin embargo, un estudio de Dvorak y Volder (2012) comprobó que en verano la reducción de la temperatura bajo un módulo de cubierta vegetal sin riego en Texas era muy significativa a pesar del bajo contenido de agua del sustrato. Su conclusión también apunta a que las mejoras en el rendimiento como consecuencia del riego artificial se encuentran fuertemente influenciadas por las condiciones climáticas locales. De nuevo nos encontramos ante otro argumento que señala la necesidad de estudiar en profundidad las condiciones de las cubiertas para cada tipo de clima, en lugar de emplear soluciones y prescripciones técnicas exportadas directamente de otras zonas climáticas.

Por otro lado, el propio sustrato actúa también como aislamiento térmico adicional a la cubierta (Fioretti et al., 2010). También en este caso se ha comprobado que la composición del sustrato afecta directamente a su comportamiento, al modificarse su conductividad y otras propiedades físicas como su capacidad de absorción de agua, tal y como se ha reflejado en el Capítulo VI.

Hay incluso autores como Palomo del Barrio (1998) que concluyen que la cubierta no actúa como dispositivo de refrescamiento en sí mismo, sino como capa de aislamiento impidiendo la entrada de calor. Aunque esta afirmación contradice los resultados de los muchos autores citados en los párrafos anteriores, es reflejo de la complejidad de medir con precisión un fenómeno que está

condicionado por multitud de factores, algunos de ellos altamente variables como el comportamiento de la vegetación o la cantidad de humedad presente en un sustrato en determinado momento del día o del año, lo que puede llevar a interpretaciones distintas de un mismo fenómeno. En cualquier caso, sus resultados sí que son coincidentes con el resto de autores, puesto que el descenso de la demanda de refrigeración existe en ambos casos, independientemente de a qué factor la atribuyan.

En su estudio demuestra que una cubierta verde bien diseñada y mantenida se comporta como un elemento eficaz de aislamiento en verano impidiendo la entrada de calor a través de la cubierta. Además, concluye que hay que seleccionar plantas con gran desarrollo o con una distribución de hojas horizontal, sustratos ligeros y con gran capacidad de almacenamiento y absorción de agua, es decir, porosos. También demuestra que el Leaf Area Index (LAI) y la sombra son los parámetros más relevantes en verano puesto que determinan la radiación de onda corta que llega al sustrato. Sin embargo su investigación presenta la limitación de estudiar solo el período de verano y presenta la necesidad de estudios más detallados sobre el comportamiento del sustrato para todo el año.

No obstante, los resultados para los períodos fríos son mucho más variables. En función del tipo de solución adoptada, pero especialmente como consecuencia del sub-clima de estudio, el adoptar una solución constructiva de este tipo puede suponer un aumento del gasto de energía durante el invierno, como habitualmente ocurre con cualquier intervención encaminada a la reducción de la demanda de refrigeración (Santamouris et al., 2007). Según Schweitzer y Erell (2014) el comportamiento térmico en invierno de una cubierta es ligeramente más favorable con una buena cobertura vegetal que sin plantas, especialmente si el sustrato contiene humedad.

En estos casos habría que estudiar el balance energético anual para determinar si el efecto es netamente positivo. Sería incluso interesante plantearse si para regiones muy cálidas, donde la demanda de calefacción sea muy baja y la necesidad fundamental sea reducir el consumo de refrigeración, no se pudiera considerar más importante el confort interior y la reducción de las potencias de climatización instaladas en contraposición a un ligero incremento de la demanda de calefacción.

Aun así, algunos estudios consiguen combinar ahorros importantes tanto en refrigeración como en calefacción. (Karachaliou et al., 2016) (Sfakianaki et al., 2009) (Zinzi & Agnoli, 2012) (Olivieri et al., 2013)

En concreto (Vidal et al., 2010), demuestran para una cubierta verde experimental con depósito de agua de lluvia integrado, ahorros del 19.81% en refrigeración y 6.91% en calefacción en un edificio de una planta en Madrid. Mientras tanto, para edificios de más de una planta, las reducciones aún son considerables: 10.5% y 3.9% respectivamente.

7.1.2 Influencia del aislamiento térmico en zonas cálidas

Como se ha comentado anteriormente, son pocos los estudios que comparan la diferente influencia de las cubiertas verdes sobre edificios con distintos grados de aislamiento. En relación a este fenómeno, surgen por parte de algunos autores dudas en cuanto a la distinta eficacia del sistema para el caso de edificios que cuenten con niveles de aislamiento ya de por sí altos en zonas cálidas como el Mediterráneo (Ascione et al., 2013).

En línea con esa hipótesis, según (Yannas et al., 2006) en una cubierta que se encuentre bien asilada, es improbable que el sustrato y la vegetación ejerzan durante el verano un efecto refrescante apreciable dentro del edificio.

Por supuesto, en esta afirmación no se valoran otros efectos positivos que las cubiertas verdes pueden aportar al edificio o la ciudad, como la reducción en la temperatura exterior, el aumento de la biodiversidad, etc. sino exclusivamente aquellos relacionados directamente con el consumo de energía en los edificios.

Por tanto, si la hipótesis de autores como (Ascione et al., 2013) o (Yannas et al., 2006) fuera acertada y aplicable a todos los casos, la utilización de cubiertas verdes como medida bioclimática en zonas cálidas, podría no ser muy efectiva para nuevas edificaciones, puesto que los edificios actuales tienden a estar entre moderada y altamente aislados, con el fin de cumplir con las cada vez más restrictivas normas constructivas actuales.

En este sentido, en línea con los compromisos europeos de reducción de consumo de energía, contenidos entre otras en la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios (2010/31/EC), las actualizaciones normativas europeas más recientes, entre las que se encuentra el Documento Básico de Ahorro de Energía

DB HE 2018, impulsan que los nuevos Edificios y aquellos sometidos a importantes rehabilitaciones sean de Consumo Casi Nulo, generalmente a través de un mejor aislamiento.

En concreto, muchos legisladores nacionales y regionales han tomado como referencia para estas nuevas normativas el estándar Passivhaus²⁴, que asegura demandas muy bajas de calefacción y refrigeración a través de un aislamiento óptimo de la envolvente y que constituye un buen ejemplo para los Edificios de Consumo Casi Nulo (Brohé & Huberland, 2017).

Sin embargo, autores como (Sfakianaki et al, 2009) comprobaron que, para edificios con buen nivel de aislamiento en Atenas, la disminución de refrigeración para verano es de hasta el 11%, aunque en invierno es más moderada, en torno al 2-5%.

Como ya se ha comentado previamente, (Karachaliou et al., 2016) concluyeron que un ahorro de 19% para refrigeración y 11% para calefacción a lo largo del año es posible, con reducciones de la temperatura superficial de hasta 15° respecto a una cubierta acabada con materiales tradicionales en un edificio aislado de oficinas en Atenas, lo que en cierta medida podría servir de comparación con nuestro estudio.

También Neila et al., (2008), en su estudio realizado en una cubierta experimental a escala real en Madrid, concluyeron que las cubriciones vegetales con aislamiento térmico se comportan mejor en todos los casos, tanto para invierno como para verano, con respecto a las mismas soluciones que carecían de esta capa de aislamiento.

No obstante, Theodosiu (2003) concluye que, aunque para optimizar el comportamiento energético en verano de una azotea situada en Tesalónica, Grecia, la mejor estrategia sería no disponer de ningún aislamiento bajo la cubrición vegetal, esto penalizaría altamente el comportamiento del edificio en invierno, que sólo sería posible compensar con un espesor mayor del sustrato.

En consonancia con estos datos, Niachou et al. (2001) concluyeron que, si la cubierta requiere un aislamiento muy importante para el invierno, los beneficios

²⁴ Para más información respecto al estándar Passivhaus y sus requisitos visitar la página web oficial del Passivhaus Institut: https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm o la Plataforma de Edificación Passivhaus de España: <http://plataforma-pep.org/>

en verano se verían reducidos equivalentemente ya que existiría muy poco contacto entre la cubierta vegetal y el interior del edificio.

Por otro lado, los investigadores Sun et al. (2014) sugieren añadir una capa moderada de aislamiento térmico adicional al conjunto de la cubierta para poder mantener un buen comportamiento térmico, a la vez que una buena disponibilidad de agua en las capas superiores del sustrato que pueda llegar fácilmente a las raíces y favorezca el enfriamiento por evapotranspiración.

De forma análoga, Gagliano et al. (2015) realizaron una comparación entre las cubiertas frías, las azoteas verdes y las tradicionales y demuestran que en el Mediterráneo las soluciones que tienen el mayor potencial de disminuir el efecto Isla de Calor en las ciudades y de reducir la temperatura interior de los edificios son las cubiertas vegetales con un aislamiento térmico moderado.

Estos autores afirman que el comportamiento de las cubiertas verdes en verano es prácticamente igual en los varios escenarios de espesor de aislamiento que simularon, confirmando que el efecto de la sombra y la evapotranspiración de la vegetación junto con la resistividad del sustrato, son los fenómenos más importantes en la reducción de la carga térmica que se transmite hacia el interior de los edificios.

En epígrafes posteriores se estudiará la influencia que ejercen en nuestro caso de estudio distintos niveles de aislamiento, comparando teóricamente un edificio tipo sin aislamiento con el mismo modelo de edificio en caso de estar altamente aislado, como es el caso de los Edificios de Consumo Casi Nulo bajo el estándar Passivhaus. De esta forma se podrá establecer la idoneidad de esta solución en varios hipotéticos escenarios como son la obra nueva, edificios en teoría correctamente aislados, o la rehabilitación de edificios existentes, construcciones que suelen carecer de aislamiento térmico.

7.1.3 Definición del edificio “modelo”

Tal y como se ha recogido en el apartado anterior, numerosos estudios evalúan la eficiencia energética de las cubiertas vegetales. Sin embargo, habitualmente, se comparan las soluciones de azoteas verdes con muestras de referencia arbitrarias, normalmente cubiertas sin aislamiento o también con datos de otros edificios existentes.

Aunque estos estudios son de indudable interés investigador, es muy difícil establecer comparaciones válidas con otros casos o con edificios en proyecto. Para resolver este problema, la implementación de un modelo de cubierta vegetal en la herramienta de simulación energética EnergyPlus, llevado a cabo por D.J. Sailor, permite estimar su comportamiento térmico de forma independiente (Schweitzer & Erell, 2014).

Por consiguiente, como se ha especificado en el capítulo de Metodología, para proceder a la evaluación del comportamiento energético de nuestra tipología de cubierta seleccionada, se establece un edificio modelo “tradicional” como base de comparación (Tipo A), para posteriormente incluirle una cubierta vegetal en su sección constructiva (Tipo B).

MODELO INICIAL EDIFICIO:

- Uso oficinas: 100 m² construidos
- Construcción tradicional
- Sin aislamiento térmico específico
- Alta permeabilidad al aire



Fig. 7.02. Tipo A. Tradicional sin aislamiento

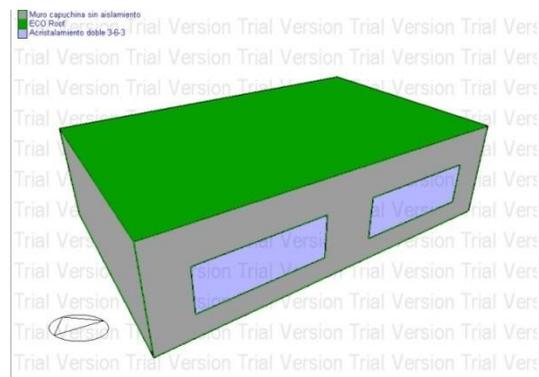


Fig. 7.03. Tipo B. EcoRoof sin aislamiento

A tal fin, se establece como base un edificio de uso administrativo/oficinas en la ciudad de Murcia, España, que cuenta con un clima cálido semi-árido según se ha definido en capítulos anteriores. De una sola altura y 100 m² de superficie construida, por 88 m² útiles.

El edificio cuenta con unos parámetros constructivos que han sido de uso muy común en la zona de estudio: estructura en hormigón armado, cimentación superficial mediante losa de hormigón, cubierta plana convencional no transitable, cerramientos de fábrica de ladrillo con cámara de aire intermedia y carpintería de aluminio sin rotura de puente térmico con acristalamiento doble.

No se considera inicialmente aislamiento térmico específico en la envolvente y la permeabilidad al aire de la envolvente (carpinterías y cerramientos) es alta, al no haberse previsto métodos específicos para reducirla. La ventilación higiénica se realiza de forma natural, mediante los huecos de carpintería. Los acabados exteriores de fachadas y cubiertas son de colores claros.

Además, para tratar de aislar correctamente la influencia de la cubierta vegetal en el comportamiento térmico global, todos los parámetros del estudio como tipo de material, espesores constructivos y disposición de las distintas capas se mantienen constantes en todas las simulaciones realizadas. Bien es cierto que para el siguiente apartado donde se evalúan los edificios bien aislados, se hará una excepción y la capa de aislamiento y su espesor se modificará para simular los edificios pasivos.

La planta del edificio es rectangular, con dirección principal este-oeste, siguiendo la orientación y proporciones consideradas óptimas para un clima cálido (Olgay, V. 1998) como es el considerado en este trabajo. Los huecos de carpintería se sitúan en fachadas opuestas norte y sur para un mejor control del soleamiento en una proporción del 30% respecto al cerramiento de esas mismas orientaciones (Givoni, B. 1976). Esto permitiría en teoría una correcta iluminación natural del espacio y una posible ventilación cruzada en las horas más frescas del verano.

Los parámetros constructivos fundamentales del edificio modelo bajo las hipótesis de aislamiento Tipo A y Tipo B se describen a continuación.

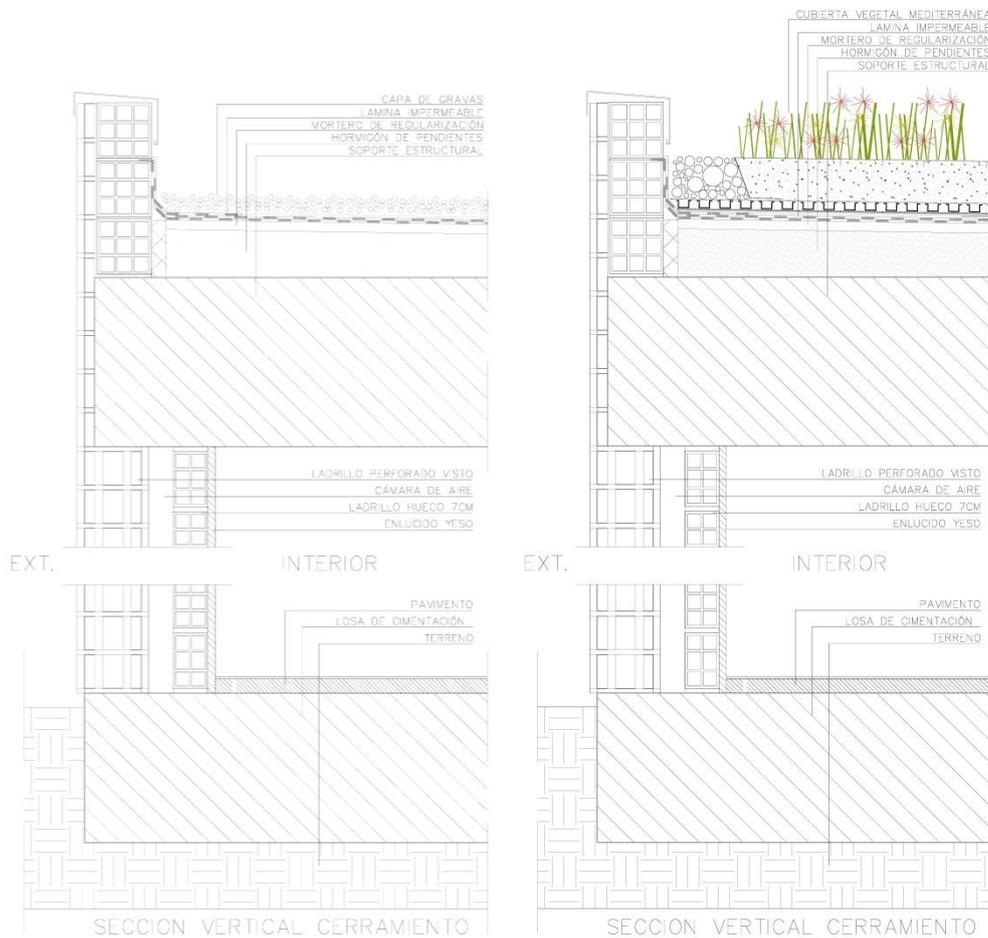


Figura 7.04. Secciones Constructivas Edificios Tipo A (izq.) y Tipo B (der). Fuente: elaboración propia.

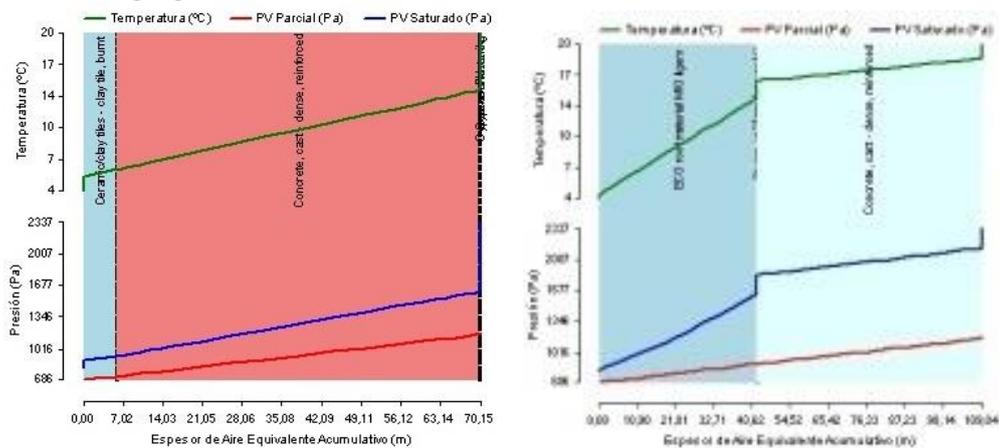


Figura 7.05. Diagramas Glaser de cubierta convencional (izq.) y cubierta con EcoRoof (der.) para el mes de enero. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

	Total	Norte	Este	Sur	Oeste
Área cerramiento [m ²]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Área de huecos [m ²]	25.02	12.51	0.00	12.51	0.00
Porcentaje de huecos [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00

Tabla 7.01. Relación hueco/macizo por cada orientación del edificio tipo. Fuente: elaboración propia a partir de los datos introducidos en el software DesignBuilder.

La hermeticidad o permeabilidad al aire se estima en $n_{50}=3$ ren/h²⁵, adoptado como valor conservador con el fin de que esta variable no distorsione excesivamente los resultados de las simulaciones.

7.1.4 Cálculos energéticos

A continuación, como se ha desarrollado previamente en el Capítulo de Metodología, la evaluación energética de los edificios Tipo se lleva a cabo mediante simulaciones dinámicas con el software DesignBuilder, que utiliza el motor de cálculo Energy Plus, elaborado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (US Dept of Energy, 2015).

Program Version	EnergyPlus, Version 8.6.0-198c6a3cff,YMD=2019.02.17
Weather File	Murcia - ESP SWEC WMO#=084300
Latitude [deg]	37.79
Longitude [deg]	-0.8
Elevation [m]	62.00
Time Zone	1.00
North Axis Angle [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

Tabla 7.02. Datos de la versión del software de cálculo empleado. Fuente: DesignBuilder.

²⁵ Según test de puerta-ventilador o *Blower door* realizado siguiendo las prescripciones de la norma UNE EN 13829.

El uso asignado al edificio es administrativo, por lo que DesignBuilder asigna por defecto un perfil de utilización específico, que es el que se utiliza en este experimento, que incluye las horas de ocupación, los criterios de confort, los requerimientos de ventilación, la carga térmica interior que aportan los usuarios además de las cargas generadas por la iluminación, el agua caliente sanitaria y los equipos informáticos.

Las características de la cubierta verde introducida para su simulación son las relativas a nuestros módulos experimentales 2 y 4, puesto que fueron los que presentaron mejores resultados.

Los parámetros de la cubrición vegetal que requiere el software para modelar correctamente el material de la capa constructiva llamada EcoRoof en DesignBuilder han sido tomados parcialmente de Olivieri et al. (2013), los cuales estaban basados en experimentos en una cubierta real de características similares a la seleccionada para este estudio, y que se encuentra situada en un edificio en la ciudad italiana de Ancona y de Ascione et al. (2013), en su investigación realizada en varias localizaciones Mediterráneas. Estos datos están en concordancia con los utilizados o recomendados por diversos autores para este tipo de solución (Sailor, DJ. 2008), (Zinzi & Agnoli, 2012), (Pisello et al., 2015).

	Unidades	Valor
Altura de vegetación	m	0.4
Índice de Área de hojas - Leaf Area Index (LAI)	-	5
Reflectividad de las hojas	-	0.3
Emisividad de las hojas	-	0.95
Densidad del sustrato	Kg/m ³	770
Capacidad térmica específica del sustrato	J/(kgK)	1500
Conductividad térmica del sustrato	W/mk	0.33
Profundidad del sustrato	m	0.15

Tabla 7.03. Características de vegetación y sustrato seleccionadas para modelizar en DesignBuilder el material equivalente, llamado EcoRoof. Fuente: elaboración propia a partir de los datos introducidos en el software DesignBuilder.

7.1.5 Influencia de las cubiertas verdes en edificios sin aislamiento.

Se procede por tanto a realizar el cálculo de consumos de energía mensuales a lo largo de un período de un año para los dos casos de edificio tipo, A y B, con el objetivo de comparar los efectos que la incorporación de la cubierta vegetal diseñada produce en este edificio modelo²⁶.

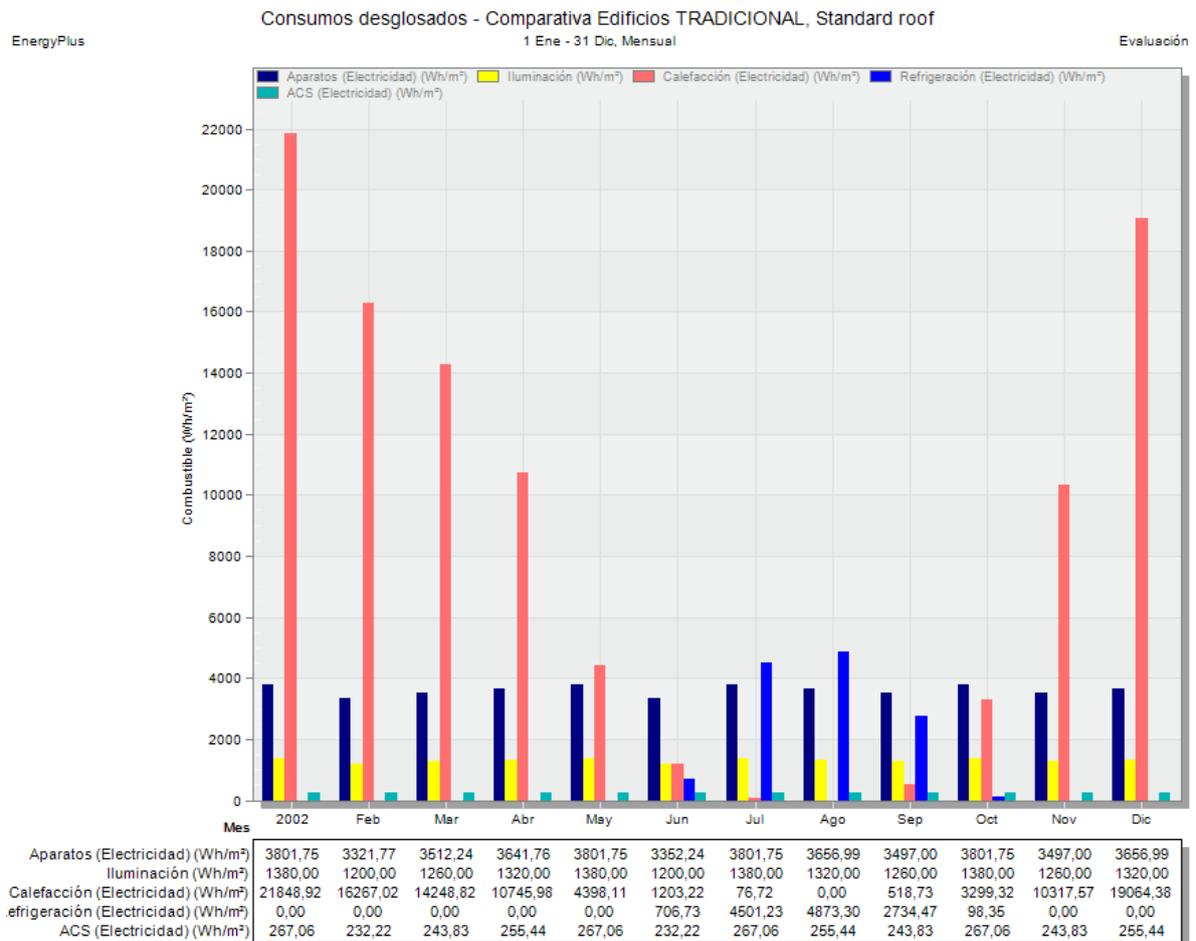


Figura 7.06. Consumos del edificio tipo A, con cubierta convencional, desglosados por servicio. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

²⁶ Los resultados completos de los cálculos realizados y sus justificaciones se pueden consultar en el Apéndice 5.

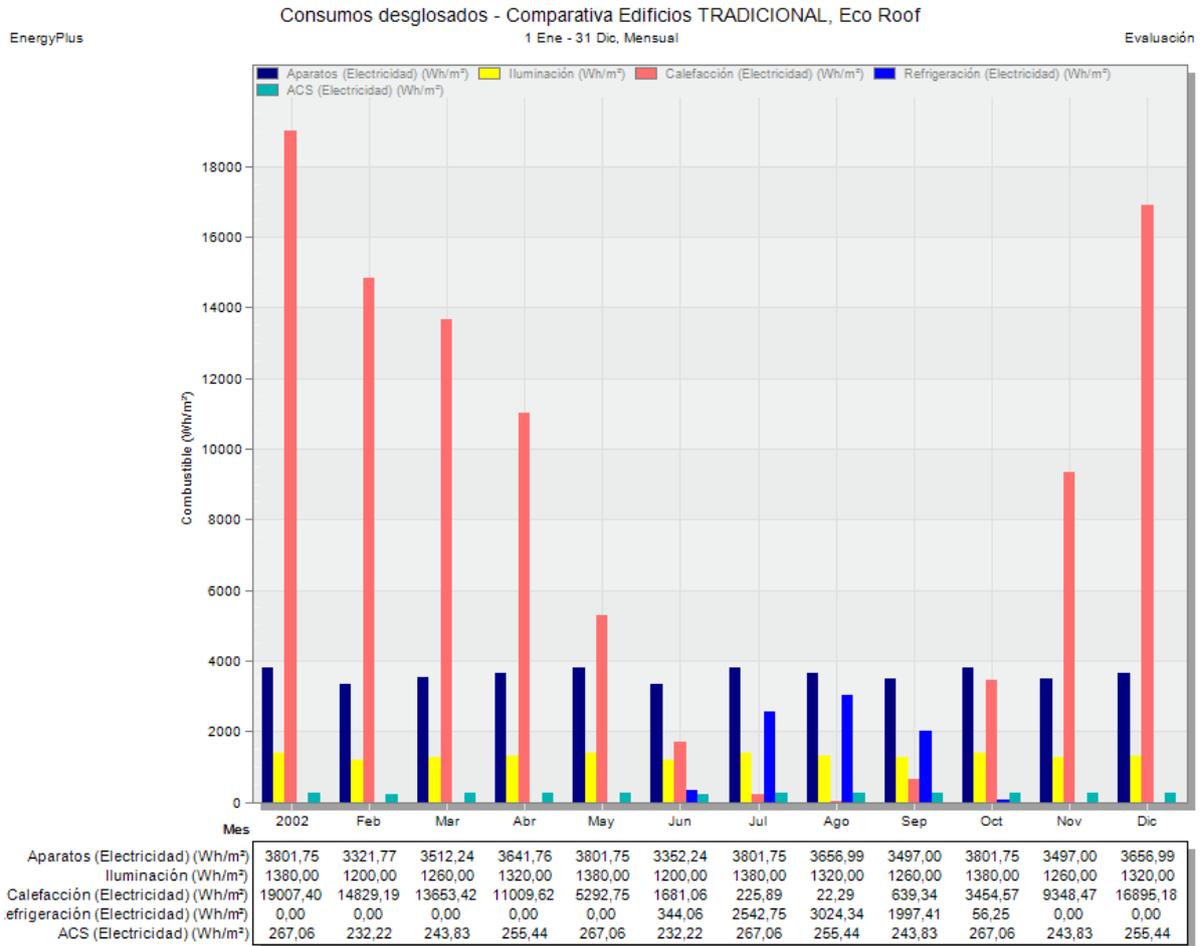


Figura 7.07. Consumos del edificio tipo B, con cubierta EcoRoof, desglosados por servicio. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

De este primer cálculo observamos que, para este caso de estudio, se producen reducciones en los consumos teóricos tanto para el período de calefacción como para los meses que requieren refrigeración, lo que demuestra que la cubierta vegetal actúa en ambos sentidos. Por un lado, funciona como dispositivo de refrescamiento en verano, bien por vía del aislamiento que proporciona, bien por su función de sombra y evapotranspiración. Por otro, no cabe duda de que contribuye al aislamiento térmico durante el invierno, al reducir la conductividad de la cubierta.

Adicionalmente, la inercia térmica que proporciona el sustrato puede contribuir también a reducir la oscilación térmica interior, aunque su efecto no es directamente cuantificable con este método.

	A	B
DEMANDA TOTAL Kwh/m2a	250,45	237,95
reducción %		-4,99%
DEMANDA CALEFACCIÓN Kwh/m2a	101,99	96,06
reducción %		-5,81%
		5,93
DEMANDA REFRIGERACIÓN Kwh/m2a	12,91	7,96
reducción %		-38,34%
		4,95
DEMANDA CLIMATIZACIÓN Kwh/m2a	114,9	104,02
reducción %		-9,47%
		10,88
PÉRDIDAS CUBIERTA W/m2	-39,23	-13,23
reducción %		-66,28%

Tabla 7.04. Mejoras energéticas que aporta la cubierta vegetal EcoRoof al edificio modelo. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

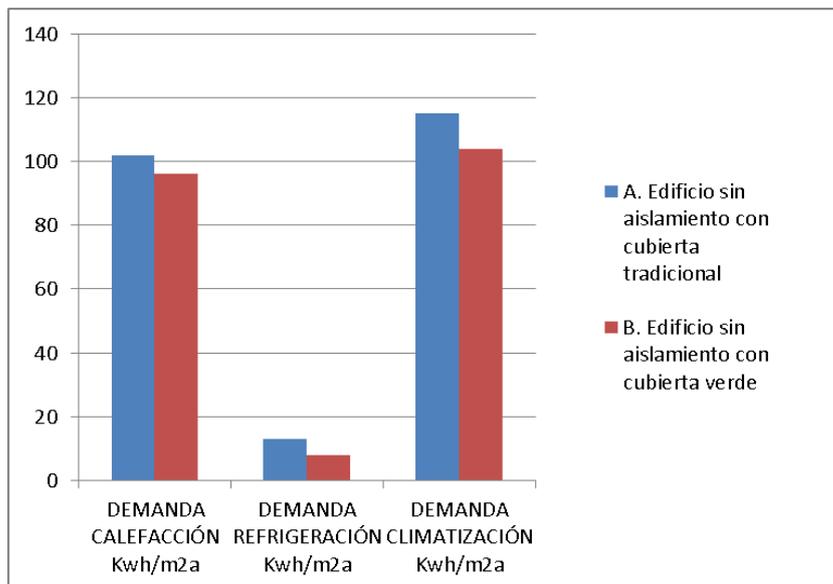


Figura 7.08. Comparación de demandas energéticas para los edificios tipo A y B. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

Es interesante remarcar que, los ahorros energéticos de invierno y verano derivados de la incorporación de la cubierta ecológica son muy similares en términos absolutos, 5,93 y 4,95 kWh/m²a respectivamente, aunque sus valores porcentuales difieran completamente, 5,81 frente al 38,34%.

Este dato puede conducir a una ligera distorsión en la percepción del efecto que las cubriciones vegetales producen en las construcciones, pero también es importante observar que para este edificio modelo, la demanda principal de energía proviene de la necesidad de calefacción para alcanzar una temperatura interior de confort, como consecuencia de la ausencia total de aislamiento térmico. Conforme los cerramientos fueran adquiriendo menores valores de conductividad, este balance de consumos verano-invierno se iría alterando²⁷.

Por otro lado, lógicamente, la cubierta del edificio es la parte de la envolvente en que las pérdidas de energía se ven reducidas más drásticamente entre ambos escenarios. Sin embargo, las consecuencias de la incorporación de la cubierta vegetal son varias.

Balance térmico del cerramiento de Cubierta para ambos escenarios												
mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Convencional(kW/m2)	-10,23	-7,44	-5,28	-2,60	1,80	4,39	7,21	7,00	3,52	-0,89	-5,60	-9,72
EcoRoof (kW/m2)	-4,36	-3,98	-3,77	-3,32	-1,77	-1,33	-0,24	0,20	-0,28	-1,69	-2,74	-4,71
Reducción (%)	-57,4%	-46,5%	-28,6%	27,7%	-198,3%	-130,3%	-103,3%	-97,1%	-108,0%	89,9%	-51,1%	-51,5%

Tabla 7.05. Alteración de la transmisión de energía por cubierta bajo ambos escenarios, A y B. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

Por un lado, como se observa en las gráficas de las figuras 7.09 y 7.10, la reducción de transmisión térmica por la cubierta al añadir el EcoRoof, viene acompañada de una reducción de los intercambios de energía por la solera del edificio, lo que podemos atribuir a la moderación en la temperatura radiante de la cubierta. La cubrición vegetal en la azotea, produce una temperatura de su cara inferior más alta en invierno y más baja en verano y la solera es la principal beneficiada de esta atemperación, puesto que tiene mucha más exposición a esta radiación proveniente del techo de las oficinas.

²⁷ Lo que no hace sino reforzar la necesidad de realizar cálculos adicionales con edificios con distinto grado de aislamiento inicial, como se podrá comprobar en el apartado 7.1.6 de este capítulo.

En cambio, la inclusión del EcoRoof, genera un ligero aumento en las pérdidas energéticas por acristalamiento y muros de la envolvente opaca, debido posiblemente al aumento de resistividad de los demás elementos del edificio.

Adicionalmente, se observa una pequeña modificación en los caudales mínimos de ventilación para conseguir una óptima calidad del aire y esto se debe a los cambios en la humedad interior que genera la inclusión de la cubierta verde. En los meses más fríos, se produce un aumento moderado de la humedad en el edificio, mientras que durante el período de verano se observa un descenso de la misma.

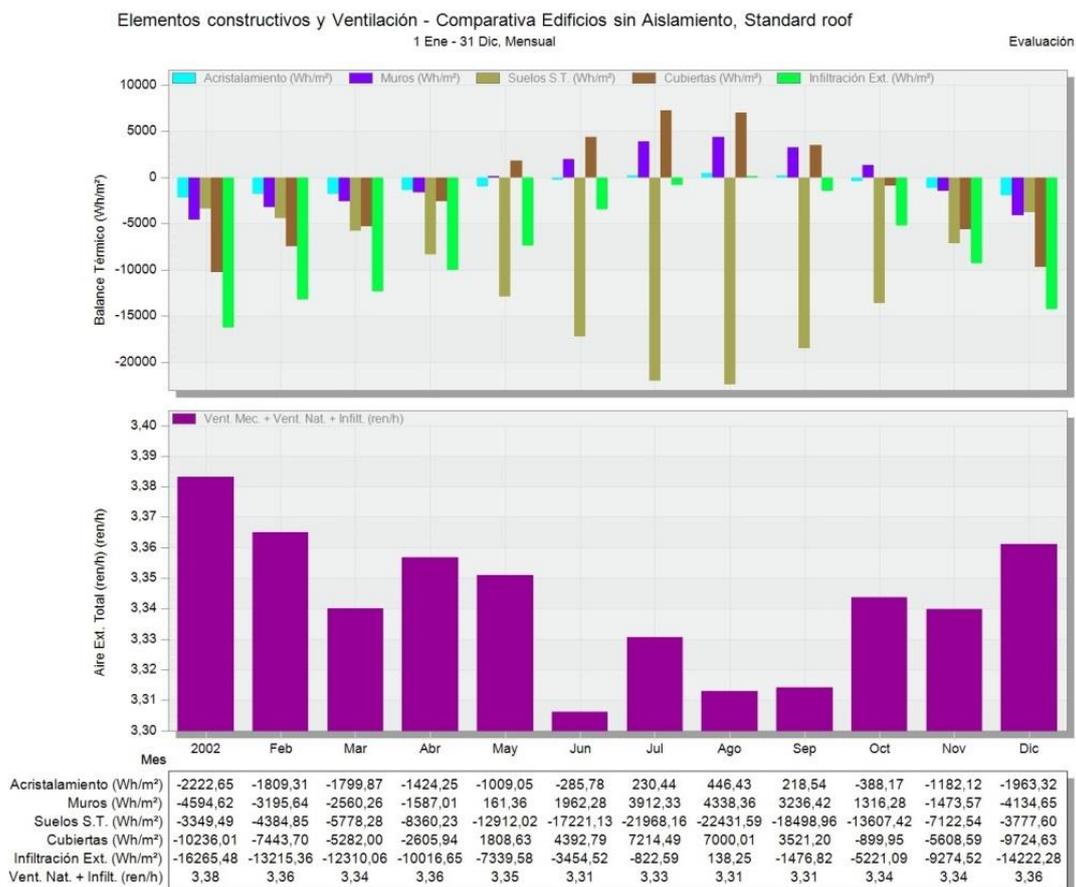


Figura 7.09. Balance energético por cerramiento y ventilación en edificio tipo A. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

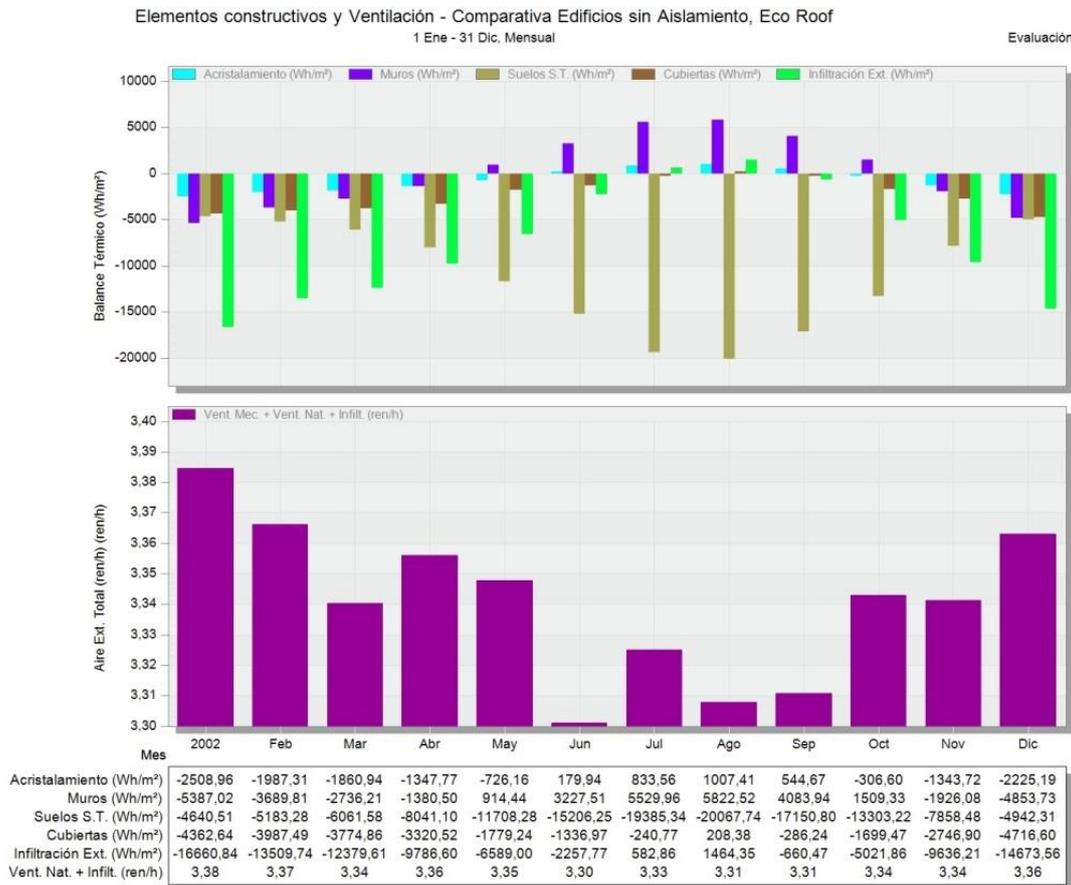


Figura 7.10. Balance energético por cerramiento y ventilación en edificio tipo B. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

Como se ha indicado previamente, las mejoras en demanda de calefacción que produce la cubierta vegetal son ligeramente superiores a las de refrigeración, 5,93 frente a 4,95 kWh/m²a. Sin embargo, en términos porcentuales, la reducción de la demanda en período de verano es mucho más acusada que durante el invierno, 38,34 frente a 5,81%. La explicación se puede inferir de las gráficas previas. Mientras durante los meses más fríos, las pérdidas de energía por cubierta se ven reducidas en aproximadamente un 50%, aquellas causadas por la infiltración indeseada de aire exterior, que constituyen el mayor porcentaje, no sufren ninguna variación. En cambio, durante los meses cálidos, la admisión de energía se concentraba exclusivamente en los cerramientos verticales, con aproximadamente un 33% del total, y cubiertas, 67% restante. Por tanto, puesto

que la azotea verde elimina prácticamente la transmisión de calor por cubierta hacia el interior de este edificio tipo, su contribución porcentual al ahorro energético en verano es muy superior.

Para entender mejor este fenómeno, pasamos a estudiar en detalle que modificaciones se producen entre el edificio tipo A y el tipo B, en un día típico del período cálido, como es el 15 julio.

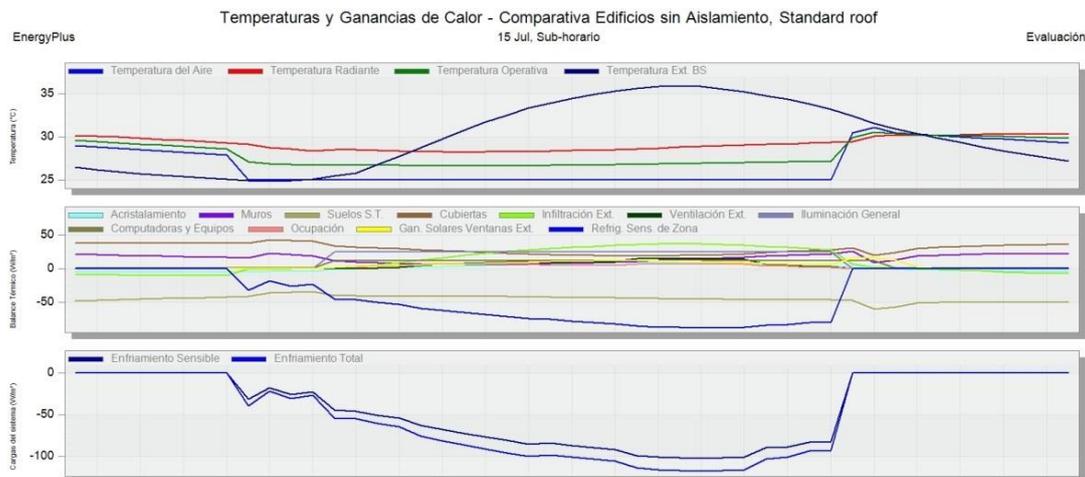


Figura 7.11. Edificio tipo A durante el día 15 de julio. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

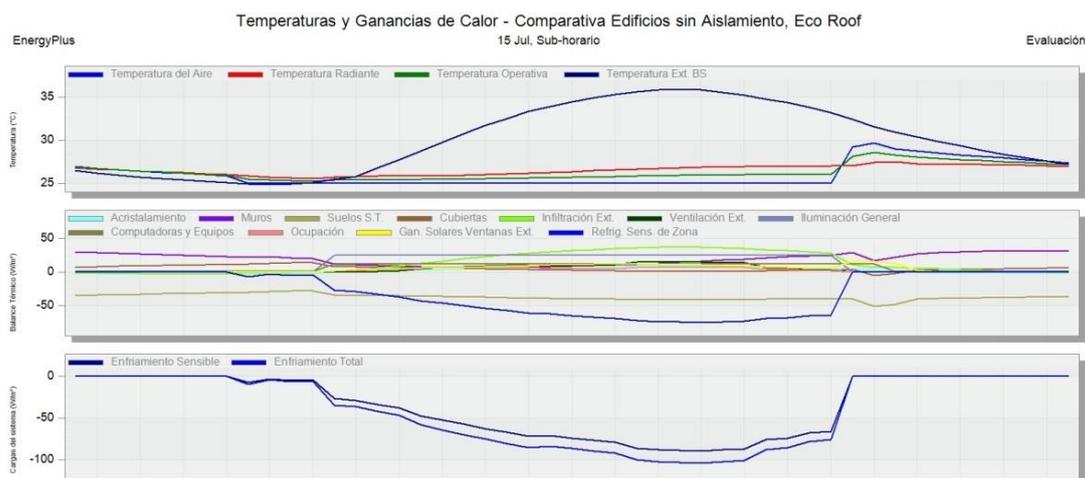


Figura 7.12. Edificio tipo B durante el día 15 de julio. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

A continuación, se presenta una comparativa directa de la situación térmica en el interior del edificio en ambos escenarios. Como se puede comprobar, la incorporación al modelo informático de DesignBuilder de la azotea vegetal, produce una reducción muy importante de la temperatura radiante de la cubierta hacia el interior del inmueble, lo que se refleja en una mejora directa de la temperatura operativa interior.

Es muy relevante que el mayor aislamiento que proporciona el sustrato junto con el incremento de inercia térmica, consigue que las temperaturas interiores del aire se mantengan mucho más moderadas, también durante el período fuera del horario²⁸ en el que se prevé climatización activa.

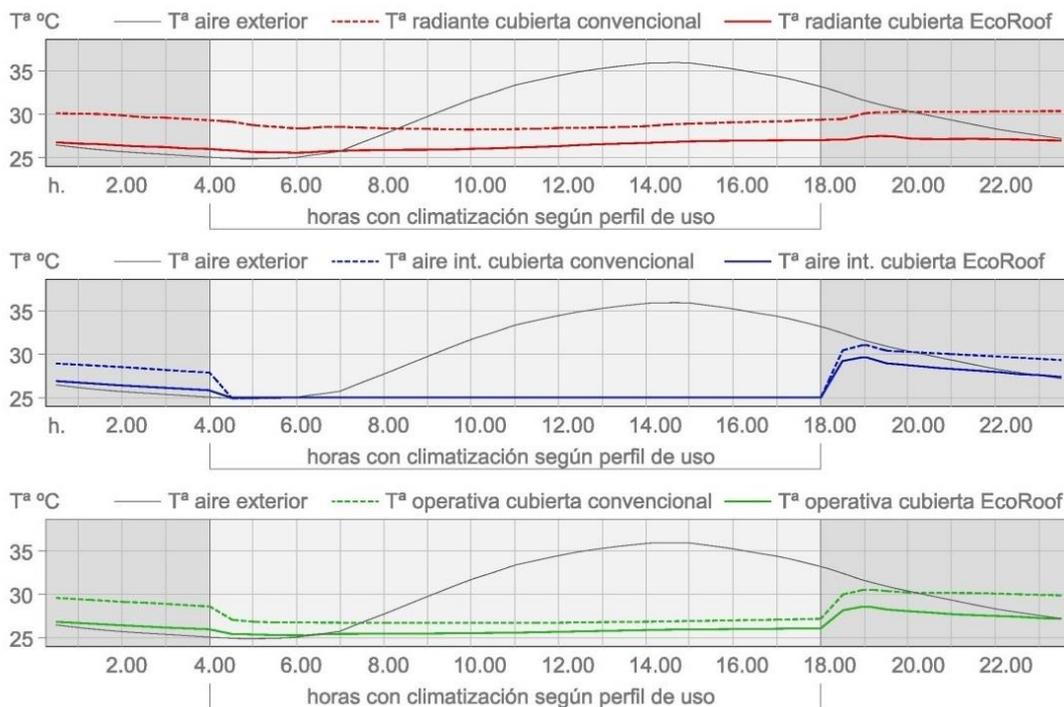


Figura 7.13. Mejoras térmicas durante el día 15 de julio de un edificio con cubierta verde respecto al edificio base sin aislamiento. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

²⁸ Es importante reseñar que en DesignBuilder, según el manual de uso “las simulaciones se despliegan en relación con la hora media local, lo cual significa que durante el verano la ocupación y otros parámetros de uso del edificio parecen iniciar una hora más temprano que en invierno”.

Este mejor comportamiento térmico del edificio durante las horas nocturnas genera una necesidad de enfriamiento sensiblemente inferior durante todo el día, hasta un 25% menos de media. Además, se evidencia especialmente la reducción, de hasta el 87%, del pico de consumo en refrigeración para conseguir alcanzar rápidamente la temperatura de confort fijada a primera hora de la mañana, que en este caso son 25 °C.



Figura 7.14. Reducción de la necesidad de enfriamiento durante el 15 de julio. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

horario	02:00	04:00	06:00	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00	18:00	20:00	22:00	DIARIO
Temperatura Radiante en el Interior del edificio con los dos escenarios de cubierta												
Convencional (°C)	29,43	28,95	28,10	27,81	27,66	27,70	27,94	28,26	28,58	29,43	29,77	28,51
EcoRoof (°C)	25,98	25,60	25,19	25,21	25,34	25,58	25,87	26,07	26,15	26,50	26,51	25,82
Reducción (%)	-11,7%	-11,6%	-10,4%	-9,3%	-8,4%	-7,7%	-7,4%	-7,7%	-8,5%	-10,0%	-11,0%	-9,4%
Temperatura del Aire en el Interior del edificio con los dos escenarios de cubierta												
Convencional (°C)	28,20	27,63	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	29,86	29,34	26,37
EcoRoof (°C)	26,12	25,58	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	25,00	28,25	27,51	25,68
Reducción (%)	-7,4%	-7,4%	horario de climatización activa Tª=25°C							-5,4%	-6,2%	-2,6%
Temperatura Operativa en el Interior del edificio con los dos escenarios de cubierta												
Convencional (°C)	28,81	28,29	26,55	26,40	26,33	26,35	26,47	26,63	26,79	29,64	29,56	27,44
EcoRoof (°C)	26,05	25,59	25,10	25,10	25,17	25,29	25,44	25,54	25,58	27,38	27,01	25,75
Reducción (%)	-9,6%	-9,5%	-5,5%	-4,9%	-4,4%	-4,0%	-3,9%	-4,1%	-4,5%	-7,6%	-8,6%	-6,2%
Demanda de enfriamiento total en el Interior del edificio con los dos escenarios de cubierta												
Convencional (W/m2)	0,00	0,00	24,78	48,51	66,47	74,91	83,72	84,02	73,51	0,00	0,00	41,45
EcoRoof (W/m2)	0,00	0,00	3,14	30,66	51,05	60,98	70,01	69,28	56,95	0,00	0,00	31,10
Reducción (%)	-	-	-87,3%	-36,8%	-23,2%	-18,6%	-16,4%	-17,5%	-22,5%	-	-	-25,0%

Tabla 7.06. Resumen de mejoras térmicas durante el 15 de julio. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

7.1.6 Influencia de las cubiertas verdes en edificios muy aislados

Conforme a los razonamientos y evidencia científica expuesta anteriormente, el objetivo de este apartado es el de cuantificar los beneficios, en términos de reducción de demanda energética, que las cubiertas vegetales aportan a las construcciones muy aisladas, como son aquellas bajo el estándar de consumo casi nulo Passivhaus, en climas cálidos como el Mediterráneo.

Para ello, al igual que en el apartado anterior en el que se estudiaba un edificio modelo sin aislamiento, los tipos A y B, en este caso se han realizado una serie de simulaciones energéticas con DesignBuilder del mismo edificio con uso de oficinas en la ciudad de Murcia. En este caso, la envolvente del edificio modelo ha sido modificada para aproximarse a un edificio Passivhaus, para posteriormente incluir de nuevo la cubrición vegetal y observar los cambios en su comportamiento térmico.

Tipo de Construcción	Ahorro energía Calefacción	Ahorro energía Refrigeración	Ahorro energía Total anual
No aislada	45 (%)	22-45 (%)	31-44 (%)
Moderadamente aislada	13 (%)	0-4 (%)	3-7 (%)
Muy aislada	8-9 (%)	0 (%)	2 (%)

Tabla 7.07. Potencial de ahorro de energía de una cubierta verde en edificios con distintos niveles de aislamiento en Atenas, según Nichaou et al. (2001).

Sin alterar el diseño inicial, se han tratado todos los puntos críticos del edificio original y se incluyen un correcto aislamiento de la envolvente, carpinterías de altas prestaciones, ausencia de puentes térmicos, ventilación mecánica controlada con recuperación de calor y alta hermeticidad al aire. Los parámetros constructivos del edificio modelo quedarían de la siguiente manera para este caso:

Cubierta: La cubierta plana inicial se complementa con 10 cm de aislamiento térmico sobre la capa de impermeabilización. En un segundo escenario se incluye también la capa de azotea vegetal sobre este espesor de aislamiento.

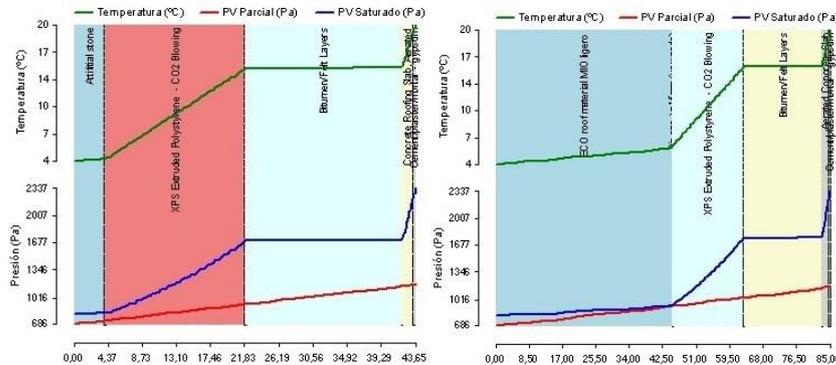


Figura 7.15. Diagramas Glaser de cubierta invertida con aislamiento (izq.) y misma configuración con EcoRoof (der.). Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

Fachadas: se incorpora al modelo original del edificio una capa de aislamiento térmico continuo de 10 cm. de espesor con una conductividad térmica $\lambda=0.036$ W/mk. Se incorpora por la cara exterior del cerramiento, con el fin de evitar los puentes térmicos de pilares, frentes de forjado, etc.

Solado: En el caso de la solera de piso, a la construcción original, que carecía completamente de elementos de aislamiento térmico, se añaden 8 cm. de espesor de aislante, de la misma conductividad térmica, bajo la capa de pavimento.

Carpintería exterior: Para este nuevo conjunto de cálculos, se sustituye la carpintería original de aluminio sin rotura de puente térmico, por otra de mejores prestaciones térmicas. En concreto, se fijan unos valores de transmitancia térmica del marco $U_f=1,1$ W/(m²K) y del vidrio $U_g=0,9$ W/(m²K).

Hermeticidad: se implementan medidas encaminadas a mejorar la estanqueidad al aire del cerramiento en su conjunto y se parte de la hipótesis de que se consigue alcanzar un valor de $n_{50}=0,6$ ren/h, tal y como exige el cumplimiento del estándar Passivhaus, para edificación nueva.

A partir de esta nueva configuración del edificio tipo, se sustituye la cubierta convencional con acabado de gravas por la cubierta verde escogida para nuestra investigación y se comparan sus demandas de calefacción, refrigeración y climatización anual.

Se procede por tanto a realizar el cálculo de consumos de energía mensuales a lo largo de un período de un año para los dos nuevos casos de edificio tipo, C y D, con el objetivo de comparar los efectos que la incorporación de la cubierta vegetal diseñada produce en este modelo de edificio muy aislado.

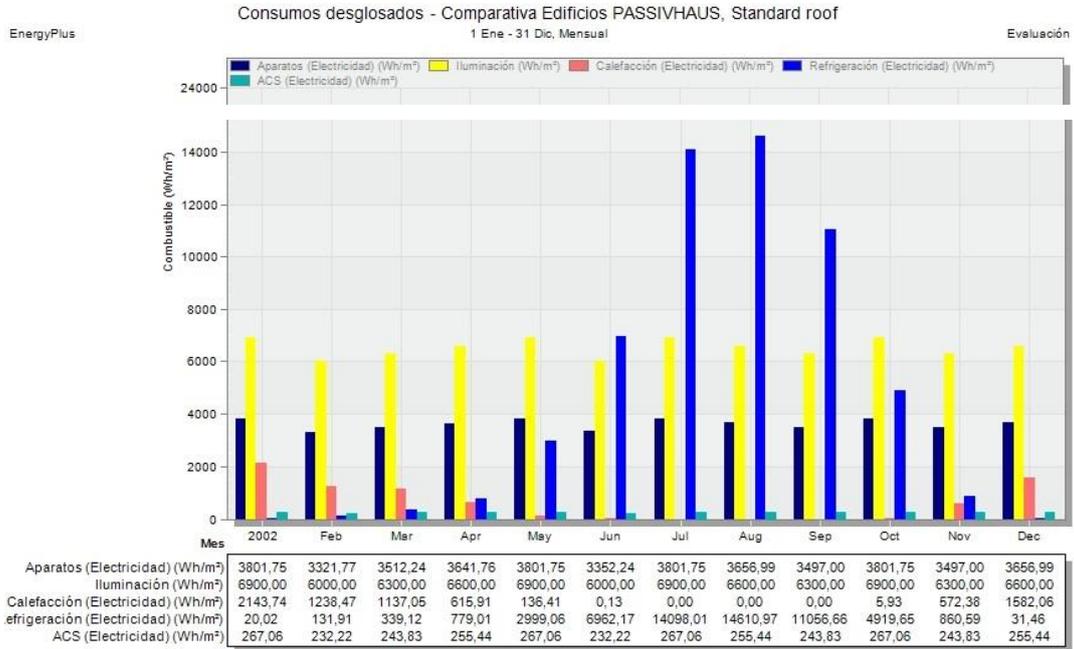


Figura 7.16. Consumos del edificio tipo C, con cubierta convencional aislada. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

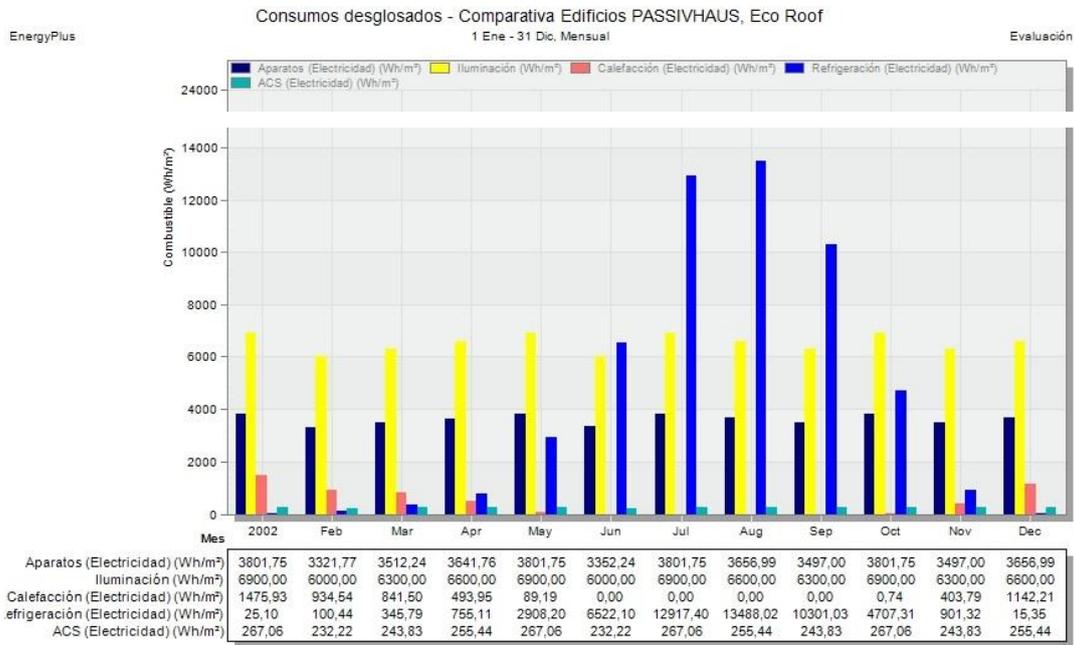


Figura 7.17. Consumos del edificio tipo D, con cubierta EcoRoof aislada. Fuente: cálculos propios en el software DesignBuilder.

	C	D
DEMANDA TOTAL Kwh/m2a	188,91	183,04
reducción %		-3,11%
DEMANDA CALEFACCIÓN Kwh/m2a	7,04	6,32
reducción %		-10,23%
		0,72
DEMANDA REFRIGERACIÓN Kwh/m2a	19,05	17,84
reducción %		-6,35%
		1,21
DEMANDA CLIMATIZACIÓN Kwh/m2a	26,09	24,16
reducción %		-7,40%
		1,93
PÉRDIDAS CUBIERTA W/m2	-2,73	-2,23
reducción %		-18,32%

Tabla 7.08. Mejoras energéticas que aporta la cubierta vegetal EcoRoof al edificio modelo aislado. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

También para este supuesto de cálculo, constatamos que se producen reducciones en los consumos energéticos teóricos tanto para el período de invierno como para los meses de verano, lo que demuestra que la cubierta vegetal actúa en ambas estaciones, incluso para nuestra hipótesis de edificios con nivel de aislamiento entre moderado y alto.

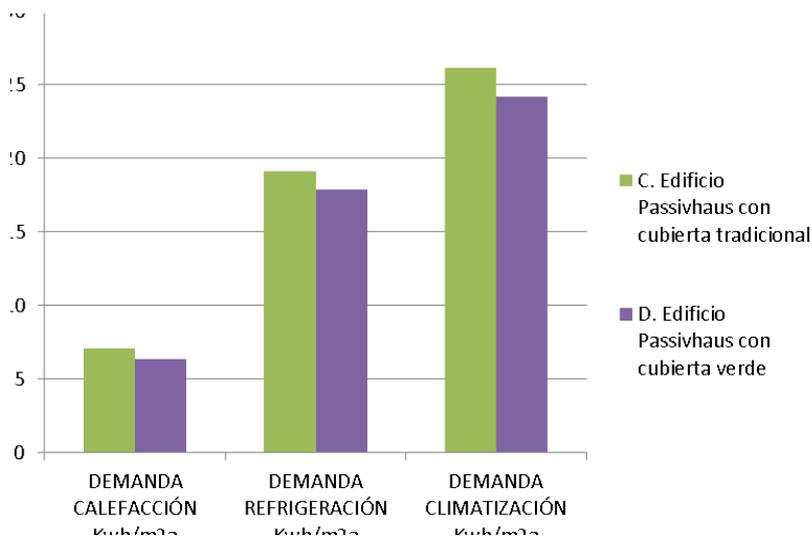


Figura 7.18. Comparación de demandas energéticas para los edificios tipo C y D. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Aislada (kW/m ²)	-1,09	-0,94	-0,80	-0,65	-0,36	-0,20	0,14	0,16	-0,98	-0,50	-0,77	-1,07
EcoRoof (kW/m ²)	-1,11	-1,04	-1,05	-1,00	-0,80	0,63	-0,48	-0,38	-0,46	-0,76	-0,89	-1,15
Reducción (%)	1,8%	10,1%	31,3%	53,8%	122,2%	-415,0%	-442,9%	-337,5%	-53,1%	51,4%	15,6%	7,5%

Tabla 7.09. Alteración de la transmisión de energía por cubierta bajo ambos escenarios, C y D. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

7.1.7 Resultados y discusión

Los resultados de este apartado del trabajo demuestran que las cubiertas verdes en el clima semi-árido Mediterráneo consiguen disminuir la demanda de energía de los edificios, bajo todas las hipótesis de estudio.

	A	B	C	D
DEMANDA TOTAL Kwh/m2a	250,45	237,95	188,91	183,04
reducción %		-4,99%		-3,11%
DEMANDA CALEFACCIÓN Kwh/m2a	101,99	96,06	7,04	6,32
reducción %		-5,81%		-10,23%
		5,93		0,72
DEMANDA REFRIGERACIÓN Kwh/m2a	12,91	7,96	19,05	17,84
reducción %		-38,34%		-6,35%
		4,95		1,21
DEMANDA CLIMATIZACIÓN Kwh/m2a	114,9	104,02	26,09	24,16
reducción %		-9,47%		-7,40%
		10,88		1,93
PÉRDIDAS CUBIERTA W/m ²	-39,23	-13,23	-2,73	-2,23
reducción %		-66,28%		-18,32%

Tabla 7.10 Resumen de ahorros energéticos por tipo de edificio. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

Como se ha desarrollado en el apartado previo, la demanda total de climatización anual para el caso de edificios sin aislamiento se reducía en torno al 9.5% al añadir una cubierta vegetal, mientras que en aquellos equivalentes al estándar Passivhaus, la reducción energética alcanza el 7.4%.

En ambos casos se puede constatar que la disminución de transmisión energética por la cubierta del edificio es muy notable al añadir el material EcoRoof a las simulaciones. En el caso de edificios sin aislamiento, las pérdidas, o

ganancias según la época del año, se reducen hasta en dos tercios del total, mientras que, para edificios fuertemente aislados, también suponen un porcentaje considerable, casi una quinta parte, a pesar del esperado efecto de desacople que produce la capa de aislamiento térmico.

Por otro lado, del análisis de los resultados obtenidos, es interesante remarcar que, para el caso de los edificios sin aislamiento, los mayores ahorros porcentuales se producen en refrigeración, mientras que para los edificios aislados se invierten los datos. Esto podría deberse al efecto comentado por Palomo del Barrio (1998), que atribuye la mayor ganancia energética a los beneficios del aislamiento adicional que proporciona el sustrato.

Parece ocurrir, por tanto, que en el caso típico de verano, introducir cualquier espesor de aislamiento térmico, por mínimo que sea, mejore muy notablemente el comportamiento del edificio sin aislar, debido a la reducción de la temperatura superficial interior de la cubierta al reducirse la transmisión de energía por conducción. Sin embargo, una vez el nivel de aislamiento es alto y este fenómeno de transmisión está controlado, añadir aislamiento adicional repercutiría muy poco en la demanda global, puesto que a partir de ese punto la mayor parte de las cargas térmicas se deben a la radiación solar introducida por los huecos y a las propias cargas internas de uso.

En el período de invierno, en cambio, el aislamiento térmico adicional que supone el sustrato sí constituye una ventaja para el edificio bajo ambos escenarios de aislamiento. Este efecto se produce porque la mayor parte de las pérdidas energéticas en esta época del año se deben a la conducción de energía a través de los paramentos, entre ellos la cubierta. Este fenómeno es aún más evidente en edificios pasivos, donde las pérdidas por ventilación y por infiltraciones de aire son mínimas y por tanto las pérdidas por conducción suponen un porcentaje mucho mayor. Por todo lo anterior, se constata una mayor sensibilidad a las modificaciones de conductividad en los paramentos durante los períodos fríos.

En resumen, se puede concluir que, para climas cálidos, esta solución constructiva aporta durante todo el año ventajas cuantitativas importantes a todas las variantes del edificio modelo estudiadas, independientemente de su grado de aislamiento térmico.

Se puede afirmar por tanto, que las edificaciones Passivhaus, u otras con similar nivel de aislamiento, aún se beneficiarían de forma importante de los

efectos de aislamiento y refrescamiento pasivo, en función de la época del año, que aportan las cubiertas verdes, incluso sin sopesar otras ventajas adicionales con impacto positivo sobre los edificios y el entorno.

Por otro lado, si los datos se analizasen estrictamente desde el punto de vista del valor absoluto y no porcentual, los resultados arrojarían conclusiones ligeramente distintas. En términos reales, los ahorros energéticos que producen las cubiertas verdes en edificios aislados se pueden considerar interesantes, pero para edificios muy aislados son poco significativos. Bien es cierto que, si se tiene en cuenta que la demanda de estos edificios pasivos era inicialmente muy baja, incluso reducciones muy considerables de su necesidad de climatización, constituirían un descenso numérico bastante escaso. En apartados posteriores se analizará por tanto si la solución es energética y económicamente rentable para estos casos donde la ganancia porcentual es relevante, pero en términos absolutos su impacto es reducido.

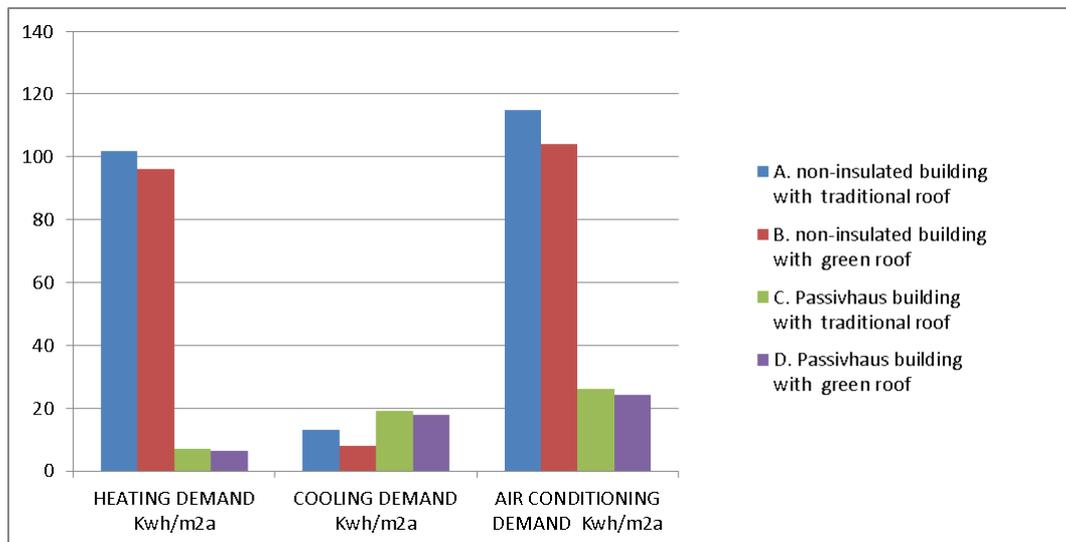


Figura 7.19. Demandas de calefacción, refrigeración y climatización para las diferentes soluciones adoptadas. Fuente: elaboración propia a partir de los resultados de cálculo.

7.2 CONSUMO DE AGUA

A la vista de los numerosos beneficios de las cubiertas vegetales, tanto cualitativos como cuantitativos en términos de reducción del consumo energético, según se ha demostrado en el apartado anterior, sería lógico pensar que esta tipología constructiva constituye un elemento netamente positivo para los edificios en cualquier tipo de clima. De hecho, se trata de una solución que ha ganado gran aceptación en los últimos años, incluso en la zona del Mediterráneo (Schweitzer & Erell, 2014).

Sin embargo, su dependencia de la vegetación y por tanto de las condiciones climáticas del lugar donde se implanten, hace necesario un segundo nivel de análisis.

En aquellas regiones donde la disponibilidad de agua es más limitada, como se trata precisamente del Mediterráneo y otros climas equivalentes presentes en distintas zonas del globo (Schweitzer & Erell, 2014), se hace necesario un estudio exhaustivo de la idoneidad de las azoteas ajardinadas particularmente si se requiere de la implementación de programas de riego artificial.

Aunque algunos autores también han realizado experimentos con cubiertas verdes en regiones secas sin ningún aporte adicional de agua de riego, dependiendo únicamente del régimen de precipitaciones, la mayoría de estudios concluyen que el desarrollo de la vegetación se ve muy condicionado, llegando incluso a ser inviable (Coma et al., 2014).

En este punto es importante remarcar, tal y cómo se ha desarrollado previamente, que la cobertura, densidad y altura de la vegetación es uno de los factores determinantes en el comportamiento térmico de las cubiertas verdes.

Por tanto, emplear sistemas de cubierta que no requieran ningún riego adicional, pero comprometan el desarrollo completo de la vegetación y consigan valores muy bajos de cobertura y crecimiento, constituye una contradicción difícilmente justificable.

El propósito de este apartado de estudio se basa precisamente en conseguir un balance óptimo entre el desarrollo satisfactorio de la capa vegetal y el gasto mínimo de agua para conseguirlo.

7.2.1 Revisión de literatura: experimentos con riego

En este sentido, se realiza una primera exploración de los resultados presentados por otros autores en relación a experimentos similares llevados a cabo en zonas climáticas lo más similares posible a la Región de Murcia. En estos estudios aparecen valores de gasto de agua de riego muy dispares que van desde los 1,10 l/m² hasta los 3,13 l/m², por lo que es necesario profundizar en sus pormenores con el fin de obtener conclusiones más acertadas.

En primer lugar, Schweitzer y Erell, (2014) realizaron en Tel Aviv un experimento con cubiertas verdes extensivas con cuatro especies vegetales autóctonas adaptadas a las condiciones de relativa aridez de la zona: *Pennisetum clandestinum*, *Aptenia cordifolia*, *Sesuvium verrucosum* y *Halimione portulacoides*. En el experimento se medían la eficiencia de enfriamiento durante el verano de cada especie y se comparaba con su consumo de agua.

Especie vegetal	Enfriamiento ΔT^a (K)	Riego diario (l/m ²)	Eficiencia enfriamiento (%)
<i>Pennisetum clandestinum</i>	1,89	7,00	3,60
<i>Aptenia cordifolia</i>	1,62	4,50	5,50
<i>Sesuvium verrucosum</i>	1,46	5,70	3,20
<i>Halimione portulacoides</i>	1,24	6,80	2,80

Tabla 7.11. Experimento realizado en verano de 2009 en Tel Aviv por Schweitzer y Erell. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos facilitados por Schweitzer y Erell, (2014).

Estos investigadores clasifican sus resultados mediante la Eficiencia de Enfriamiento, que es la ratio entre la reducción del calor sensible en el edificio-probeta y la cantidad de agua aportada al mismo, en valores equivalentes de calor latente de evaporación. Por tanto, el resultado es un valor porcentual, lo que facilita la comparación entre experimentos con diferentes características térmicas, diferentes condiciones climáticas. Aunque no será el método comparativo empleado en este trabajo, puesto que la reducción del calor sensible es un parámetro menos relevante o generalizado a nivel de edificios, sí que se empleará un procedimiento similar, tal y como se ha explicado previamente.

De sus resultados se puede concluir que a pesar de que *Aptenia cordifolia* fue la especie más eficiente (5,50%) en reducción en la T^a interior del edificio tipo y al mismo tiempo la que menor riego necesitó, su consumo de agua fue importante, con 4,50 l/m² por día de media. Con este ratio una cubierta de 100 m² necesitaría cada mes 13.500 litros de agua, lo que sólo durante los meses de verano supondría más de 40 m³. Esto en lugares como el Mediterráneo, donde las precipitaciones son muy escasas durante muchos meses, sería un obstáculo para su justificación.

También investigadores como Kotsiris et al., (2013) afirman que para cubiertas vegetales intensivas en la zona mediterránea, un sistema de riego es indispensable, aunque sí valoran que la cantidad y frecuencia del riego depende de muchos factores como la especie vegetal, el tipo de sustrato y la profundidad. En su caso, realizaron un experimento con probetas que simulaban dos cubiertas verdes en Atenas con 30 y 40 cm. de profundidad respectivamente en las que plantaron ejemplares de *Pittosporum tobira*, un arbusto de porte medio, y *Olea europaea*, olivo en forma de ejemplares jóvenes, fijando un riego artificial medio de 3,80 l/m²d, derivados de un régimen de 30 minutos de riego cada 3 días. De acuerdo a su estudio, ambas especies obtuvieron crecimientos satisfactorios para los dos espesores de sustrato estudiados, por lo que el riego establecido se considera suficiente para la supervivencia de esas cubiertas vegetales en cuestión. Aun así, estos valores se encuentran bastante por encima de los experimentos más eficientes encontrados en la literatura científica.

En un estudio previo, Kotsiris et al. (2012), habían ya realizado otro experimento en Atenas con la especie *Lavandula angustifolia* donde habían sido capaces de obtener un buen resultado de desarrollo de la vegetación con aporte de agua de riego equivalente a 650 l/m²a, lo que suponen 1,78 l/m²d, sin tener en cuenta que durante los períodos más lluviosos se podría reducir la irrigación artificial.

Por otra parte, Savi et al. (2013) utilizaron *Salvia officinalis* en una cubierta experimental en Trieste donde dispusieron un total de 16 módulos de 60x40x30 cm. a los que trataban con un programa de riego establecido. Inicialmente para el establecimiento de la vegetación aplicaron 2 litros por semana durante el primer mes, lo que equivale a 1,20 l/m²d. Después sólo algún riego ocasionalmente desde abril a octubre, que coincide con la duración del experimento. Sumando todos los episodios de riego al final del período de 180 días, habían utilizado 199,00 l., lo

que supone una media de 1,10 l/m²d. A este valor habría que añadir las precipitaciones que se produjeron durante ese tiempo, 311 mm., o lo que es lo mismo 1,73 l/m²d.

Posteriormente, en otro estudio encabezado por los mismos autores, Savi et al. (2014), emplearon de nuevo la *Salvia officinalis* para estudiar los efectos del hidrogel en el estado de las plantas. En este caso utilizaron 30 módulos de 40x40 cm. a los que añadían 3,40 l/m² tres veces las primeras 2 semanas, equivalente a 1,45 l/m²d. Posteriormente añadieron riegos esporádicos durante las épocas más secas de los 139 días que duraba el test, con un total de 256 mm., es decir 1,84 l/m²d, entre el 1 mayo y el 16 de septiembre de 2013. También en este caso es remarcable la acumulación de lluvias de 243 mm. en primavera y 185 mm. en verano, que se intensificó especialmente en septiembre, para totalizar hasta 3,08 l/m²d.

Por su parte Ntoulas et al. (2013), aplicaron también un riego inicial mayor durante el período de establecimiento de la especie *Zoysia matrella* que emplearon en sus pruebas en la Universidad de Atenas. Posteriormente estudiaron dos períodos diferentes de estrés hídrico durante el siguiente verano, en los que aplicaban irrigación mínima cada tres días con el objetivo de estudiar el crecimiento y supervivencia de esta especie ante las condiciones extremas que imponen las cubiertas vegetales extensivas con espesores muy bajos. Sus resultados reflejan que un contenido de humedad del sustrato de tan sólo el 13% era suficiente para obtener una buena cobertura y un correcto estado fisiológico de la vegetación.

7.2.2 Revisión de literatura: experimentos sin riego

Existen, por otro lado, un número reducido de estudios de cubiertas vegetales sin riego artificial en climas Mediterráneos y semi-áridos que recojan los suficientes datos para poder ser comparables en esta investigación.

En uno de ellos, Nardini et al. (2012), realizan una serie de experimentos con dos variedades arbustivas, *Cotinus coggygria* L. y *Prunus mahaleb* L. y comparan sus resultados con una mezcla de 27 plantas herbáceas locales. Su programa de riego consiste en irrigar hasta la saturación del sustrato una vez a la semana durante el primer mes de adaptación y posteriormente eliminar por

completo el aporte artificial de agua. Sin embargo, aunque las especies sobreviven y crecen en esas condiciones, la vegetación sólo es capaz de cubrir algo más de la mitad de los módulos, en parte por la corta duración del estudio. Es por ello que sus resultados arrojan que la influencia térmica de la cubierta sobre el edificio es muy baja y depende más de la profundidad del sustrato que de la presencia de vegetación. Alegan que, probablemente, un porcentaje de cobertura superior podría incidir positivamente en la eficiencia de su cubierta.

Por su parte, Nektarios et al. (2015) realizaron varios experimentos con 40 probetas plantadas con *Sedum sediforme* en Atenas. El estudio comprendió un primer año de establecimiento de la vegetación, en el que se introdujo riego artificial durante los períodos de estrés hídrico del verano, a razón del 15 y 30% de la evaporación equivalente diaria, E_{pan} , aunque este dato no se cuantificó en litros. Posteriormente, para el verano del segundo año, la serie de probetas que había tenido mayor cantidad de riego en la fase inicial se volvió a complementar con el 30% de E_{pan} mientras que la otra mitad no recibió ningún riego adicional desde el 24 de junio, fecha en la que se irrigaron hasta la saturación las 40 probetas, para iniciar el período de estrés hídrico en las mismas condiciones.

Sus conclusiones revelan que todos los ejemplares de *Sedum sediforme* habían sobrevivido a los dos veranos de estudio incluso aquellos que no tuvieron riego durante el segundo año. Sin embargo, sí que detectaron un mayor índice de área de las hojas y un mayor peso seco de las mismas en aquellas probetas con el régimen de riego superior, lo que redundaba en una mejor cobertura y mayor protección a la entrada de la radiación solar en el edificio.

También Dvorak y Volder (2012) comprobaron que en verano la reducción de la temperatura bajo un módulo de cubierta verde sin riego en Texas era muy significativa a pesar del bajo contenido de agua del sustrato. No obstante, reportaron también que la ratio de cobertura de la vegetación fue del 50% en el mejor de los casos, aún con riego inicial hasta la fase de establecimiento, por lo que los objetivos y beneficios de la azotea ajardinada no se podrían alcanzar por completo.

Por su parte, Farrell et al. (2012), emplearon para su experimento en Melbourne, cinco especies de suculentas autóctonas o naturalizadas en Australia, *Disphyma crassifolium*, *Carpobrotus modestus*, *Sedum pachyphyllum*, *Sedum clavatum* y *Sedum spurium*. Durante los períodos de estudio, consiguieron que todas las

especies se mantuvieran con vida al menos durante 66 días, mientras que algunas como *S. pachyphyllum* sobrevivió hasta 113 días sin riego ni precipitaciones, puesto que las probetas se encontraban en un invernadero cubierto y con temperaturas controladas.

7.2.3 Factores socioeconómicos

Además de los factores intrínsecamente biológicos, habría que considerar también una serie de factores socioeconómicos a la hora de evaluar la conveniencia del empleo de agua para riego en las cubiertas verdes, como pueden ser el precio del agua, sus regulaciones de uso o la viabilidad económica de la solución constructiva.

Por un lado, autores como Ascione et al. (2013) estudian la viabilidad económica de una cubierta vegetal aplicada en varias ciudades europeas: Sevilla, Barcelona, Londres, Ámsterdam y Oslo. Realizan simulaciones energéticas siguiendo un modelo matemático y comparan el ahorro de energía conseguido al utilizar este sistema con el gasto de agua calculado, teniendo en cuenta los precios locales del agua.

Sus conclusiones, a pesar de tener únicamente en cuenta el coste del agua sin incluir los costes de instalación, apuntan que para aquellos climas más cálidos, Barcelona y Sevilla, no sería rentable utilizar las cubiertas de su estudio debido a la limitada precipitación y los precios del agua y de la energía.

Por ejemplo, para una cubierta de *Sedum* en Sevilla calculan necesarios 640 l/m²a de riego artificial concentrados entre los meses de abril a septiembre, mientras que una cubierta compuesta por gramíneas requeriría 1.145 l/m²a, convirtiendo ambas soluciones en poco rentables económicamente.

También Sun et al. (2014) realizan un análisis de coste-beneficio comparando una cubierta de *Sedum* con y sin riego en Pekín. Su estudio analiza si los costes adicionales que supone el agua de riego se compensan con el menor gasto energético del edificio debido al incremento del refrescamiento evaporativo de la cubierta. Sí es importante remarcar que el estudio no tiene en cuenta la cobertura y supervivencia de la vegetación para el caso sin riego, estableciendo como premisa válida que el *Sedum* podría mantenerse sin aporte adicional de agua. Tampoco tienen en cuenta la inversión inicial en la instalación de riego,

afirmando que los bajos costes laborales y de material en China no supondrían una diferencia apreciable.

Su conclusión apunta a la efectividad del riego como elemento disipador de energía, produciendo un ahorro económico global incluso teniendo en cuenta el coste del agua asociada. Apuntan también a los beneficios cualitativos del riego en estas cubiertas, como serían la reducción de la polución y emisiones de CO², el mayor secuestro de CO² producido por plantas con mayor crecimiento y la mayor reducción del efecto de isla de calor, que a su vez disminuye el consumo energético del propio edificio y a escala de ciudad.

Sin embargo, a pesar de las consideraciones económicas de estos trabajos citados anteriormente, en el caso de la presente investigación, no se pretende realizar un análisis exclusivo coste-beneficio, puesto que los factores socioeconómicos no permiten la extrapolación directa de los resultados más allá del contexto regional, al depender en gran medida del coste del agua, la energía y la mano de obra, mientras que los parámetros energéticos sí son reutilizables en cualquier ubicación.

7.2.4 Objetivos de la fase experimental

Con el propósito de posteriormente analizar la eficiencia energética global de nuestra cubierta experimental escogida, se estudian varias fases temporales con distintos modelos de riego. En esta investigación, no se tendrá en cuenta el gasto de agua por su valor económico, puesto que el análisis coste beneficio es muy intrínseco a una localización concreta, por lo que se darán valores absolutos para su sencilla comparación con experimentos en distintas zonas geográficas.

Por otro lado, sí que podría ser interesante cuantificar la llamada “eficiencia de enfriamiento” de las soluciones de cubierta propuestas en esta investigación. Sin embargo, debido a la metodología de trabajo utilizada, los resultados no serían comparables con anteriores autores, por lo que se descarta esta opción.

Por tanto, se adoptará un parámetro alternativo para cuantificar la idoneidad de las diferentes soluciones, basado en las demandas de energía para climatización. Por un lado, en los apartados anteriores de este capítulo, se ha estudiado la reducción de la demanda de energía para calefacción y refrigeración que aporta una cubierta verde al edificio modelo. A continuación, se relata el

consumo de agua empleada para el mantenimiento de la vegetación en buen estado durante los experimentos, para a posteriormente, analizar la demanda de energía neta necesaria para proveer esta agua adicional de riego imprescindible para la supervivencia de las especies vegetales propuestas.

Sin embargo, la literatura disponible relativa al consumo de agua de especies de bajo riego en cubiertas verdes en el Mediterráneo es muy escasa, especialmente en cuanto a especies autóctonas se refiere. En vista de ello, nuestros experimentos de riego adoptan como punto de partida los valores más bajos encontrados entre los resultados publicados por los diferentes autores analizados en los párrafos previos.

7.2.4.1 Datos climáticos durante los experimentos

Sin embargo, la existencia o intensidad del aporte de riego no es continua, sino que varía en cada estación del año, por lo que se hace necesario recoger simultáneamente los datos climatológicos de cada etapa de los experimentos de campo, con el fin de obtener el dato acumulado de necesidades hídricas por temporada.

Además, como se ha observado anteriormente, la variabilidad del clima en el corto plazo es muy grande, por lo que las medias históricas disponibles pueden sufrir muchas variaciones en períodos de tiempo cortos como son de año en año. Por tanto, los datos específicos del período en el que se llevaron a cabo los experimentos con vegetación en probetas se han recogido y se expondrán junto con los resultados de cada fase de los experimentos, con el fin de observar si existieran discrepancias relevantes respecto a la tendencia climática histórica.

En concreto, los años 2017 y 2018, entre los que transcurrieron los ensayos, arrojan datos globales que difieren bastante a las series históricas consultadas.

Por un lado, si para el año promedio, la Temperatura media se sitúa en torno a los 18,6 °C, para los años 2017 y 2018 se registran 19,3 °C y 19,1 °C respectivamente.

Por otro, las precipitaciones medias se sitúan históricamente alrededor de los 293-297²⁹ mm/m²a, mientras que en las dos anualidades estudiadas tan sólo alcanzan los 176 y 270 mm/m²a.

De hecho, según las características climáticas del año 2017, con temperaturas superiores a la media y precipitaciones muy por debajo del resto de años, el clima de Murcia pasaría de ser considerado como BSh, estepa seca cálida, en las escalas de Köppen-Geiger y BS en la de Köppen-Trewartha a convertirse respectivamente en BWh, desértico cálido, y BW, desértico, por lo que los experimentos llevados a cabo durante este año, podrían considerarse como uno de los escenarios más extremos posibles para la supervivencia de la vegetación.

Por su parte los datos del año 2018 situarían al clima de Murcia en el límite entre BSh y BWh en la clasificación de Köppen-Geiger, mientras que según Köppen-Trewartha se habría convertido completamente en BW o desértico, con lo que también podemos afirmar que las condiciones de los ensayos durante este período reflejarán condiciones más difíciles que las medias históricas. No contamos con la misma certeza sin embargo a la hora de predecir las condiciones climáticas de años futuros, que según se deduce de las últimas series de datos cada vez son más inestables y tendentes a la desertización, al menos climática como hemos señalado anteriormente.

²⁹ De los dos valores referidos en el Capítulo V, se prefiere emplear en los cálculos el más conservador de ellos, referente al período 1982-2012.

7.2.5 Primer Experimento: de 05 de junio a 13 de septiembre de 2017 (100 días)

Para comenzar la serie de mediciones con nuestras cubiertas verdes a escala, durante el primer verano de investigación, se seleccionan las especies que se han considerado más idóneas para este tipo de aplicación y se trasplantan a los módulos experimentales.

Inicialmente se somete a las plantas a un período con riego inicial de adaptación, con el objetivo de que enraícen correctamente en el sustrato. A continuación, durante los meses de julio y agosto, se somete a las plantas a un modelo de riego mínimo de mantenimiento, para comprobar su correcta supervivencia.

Como se ha desarrollado en el Capítulo 6, las especies seleccionadas para esta primera fase son:

- *Lygeum Spartum* o Albardín (viveros Muzalé)
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino (viveros Muzalé)
- *Thymus zygis sub. Sylvestris* o Tomillo fino (viveros Muzalé)
- *Helichrysum stoechas* o Siempreviva (viveros Muzalé)
- *Ephedra fragilis* o Efedra (viveros Muzalé)
- *Rosmarinus eriocalix* o Romero blanco (viveros Muzalé)



Figura 7.20. Imagen de las cuatro probetas tras su plantación el 7 de junio de 2017, ubicadas en el exterior del laboratorio de materiales de la UCAM. Fuente: autor.



Figura 7.21. Las probetas 1, 2, 3 y 4 tras su plantación el 7 de junio de 2017. Fuente: autor.

7.2.5.1 Datos climáticos: del 05 de junio al 13 de septiembre de 2017 (100 días)

Durante el primer experimento de campo, que transcurre entre los meses de junio y septiembre de 2017, los datos de la estación meteorológica de Murcia son los siguientes.

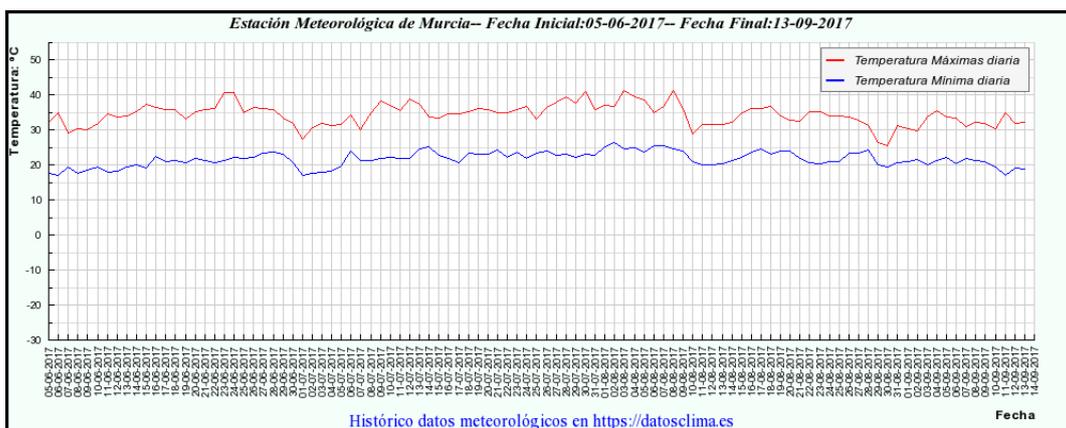


Figura 7.22. Gráfica de Temperaturas medias máximas y mínimas. Datos de AEMET recabados de <https://datosclima.es/Aemet2013/Tempestad2013.php>

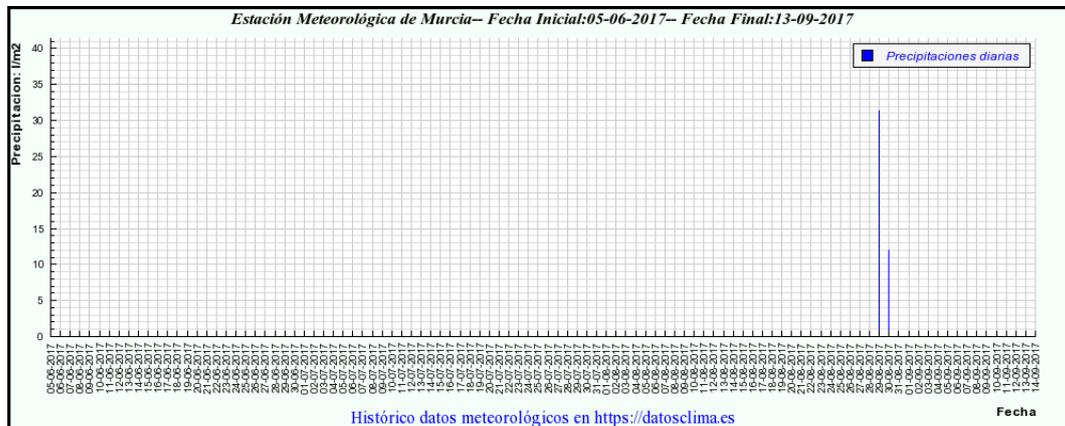


Figura 7.23. Gráfica de precipitación diaria. Datos de AEMET recabados de <https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitastad2013.php>

	Histórico	Año 2017	Histórico	Año 2017
	Tª Med °C	Tª Med °C	Pluv. mm	Pluv. mm
Junio	24.2	26.8	18	0.51
Julio	27.2	28.1	3	0.76
Agosto	27.6	27.7	8	43.94
Septiembre	24.2	24.4	32	0.76
Año	18.6	19,3	297	176.5

Tabla 7.12. Tabla comparativa de valores de Temperatura y Precipitación históricos y del período de estudio. Datos recabados de AEMET.

De las gráficas anteriores se puede observar que los valores de temperaturas medias mensuales fueron sensiblemente más altos en el período del experimento que los valores normales medios y la precipitación algo inferior y concentrada en un solo episodio puntual ocurrido el 29 de agosto, donde se recogieron hasta 31,4 l/m², mientras que el resto del período, junio, julio y septiembre, fue completamente seco.

7.2.5.2 Período de adaptación 05/06/2017 a 02/08/2017 (58 días)

Al igual que la mayor parte de autores consultados, tras el trasplante de los esquejes desde el vivero a los módulos de laboratorio se inicia un período de riego de adaptación. Aún más importante resulta este paso para nuestro primer experimento, puesto que la época de trasplante, junio, no es en absoluto la idónea.

El programa de riego inicial consiste en aportar 20 litros al total de los módulos cada 2 días. Sin embargo, por motivos logísticos se decide finalmente realizar un aporte equivalente dividido en 2 veces por semana. Por otro lado se estudia también la precipitación natural que reciben los módulos en cada período, para conocer con exactitud la cantidad de agua total que reciben las plantas.

TOTAL RIEGO INICIAL: 5,00 l/m²d

TOTAL PRECIPITACIÓN: 0,60 l/m² total (0,01 l/m²d)



Figura 7.24. Imágenes de las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 6 de julio 2017.
Fuente: autor.

7.2.5.3 Período de experimentación 02/08/2017 a 13/09/2017 (42 días)

Durante el mes de agosto y el inicio de septiembre, se somete a las probetas al primer test de estrés hídrico severo. Además este período coincide con las temperaturas más altas del año y por tanto la evaporación es máxima.

Antes de iniciar del test se realizan fotografías de cada uno de los ejemplares vegetales y se toman anotaciones del estado de las plantas, con el fin de evaluar si serán capaces de sobrevivir e incluso prosperar en estas condiciones. Esta primera evaluación arroja ya datos relevantes respecto al espesor ideal de una cubierta vegetal con este tipo de vegetación.

Desde el momento de su plantación hasta el inicio del primer test (42 días), los ejemplares situados en aquellas probetas con 15 cm. de espesor de sustrato se han establecido bien y a excepción de algún ejemplar aislado de tomillo han sobrevivido por completo.



Figura 7.25. Probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 31 de julio 2017. Fuente: autor.

Por el contrario, la mayoría de especies ha sufrido mucho para establecerse en los dos módulos que sólo contenían 7,5 cm. de sustrato, a pesar del riego aportado, que podría considerarse suficiente. En concreto, tres de los cuatro esquejes de tomillo, dos de los esquejes de albardín y dos de los ejemplares de romeros se han perdido por completo. Presentan partes secas varios ejemplares de *Helichrysum* y *Ephedra*. *Limonium Caesium* es la especie que mejor parece haberse adaptado a este sustrato artificial de tan reducido espesor.



Figura 7.26. Probetas 2 y 4, de 7,5 cm. de espesor, el 31 de julio 2017. Fuente: autor.

Respecto al riego, hasta ese momento se habían estado utilizando 5,00 l/m²d para todas las cubetas. A partir de ese instante, dos de las probetas (2 y 4) no tendrán ningún riego y las otras dos (1 y 3) bajarán a 1,00 l/m²d a base de un solo riego semanal con 3,50 l. por cada una.

TOTAL RIEGO: 1,00 l/m²d

TOTAL PRECIPITACIÓN: 44,00 l/m² total (1,04 l/m²d), aunque 43,40 l. corresponden al 29- 30 agosto, por lo que el dato está distorsionado.

TOTAL: 2,04 l/m²d (En realidad serían 1,01 l/m²d hasta el 28/08)

Durante el tiempo de este primer experimento aparece un episodio localizado de lluvias muy intensas al final del período de estudio, que por lo demás es completamente seco, lo que hace que los datos de precipitación se distorsionen ligeramente. Aun así, las cuatro probetas han permanecido desde el 2 al 28 de agosto sin recibir ningún aporte de lluvia.



Figura 7.27. Imágenes de las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 13 de septiembre 2017

Según se puede observar en las fotografías tomadas al final de este período experimental, en las dos cubetas con 15 cm. de sustrato la supervivencia general de las plantas continúa siendo alta. En el módulo que contaba con aporte artificial de agua durante este tiempo, todas las especies, excepto el *Helichrysum*, continúan en buenas condiciones. Sorprendentemente, para el módulo de 15 cm. que ha pasado 42 días sin riego, las especies que estaban en buenas condiciones al inicio del experimento continúan vivas, aunque algunas mostraban signos de agotamiento.

Para el caso de los módulos de 7,5 cm. de espesor, los datos no son tan positivos. A las especies que habían muerto nada más trasplantarse se suman ahora varios ejemplares más, tanto en el módulo que ha contado con riego como en el que no lo ha tenido. Estos resultados vienen a demostrar que el espesor del sustrato tiene un papel fundamental en las condiciones de desarrollo de las plantas, bien sea por su mayor capacidad de retención de agua, su mayor inercia y capacidad aislante (protege las raíces de temperaturas extremas) o simplemente por el mayor espacio disponible para el desarrollo radical de la vegetación. Es curioso observar, que el módulo que había quedado sin riego durante el verano presenta más ejemplares vivos y en mejor estado que aquel que dispuso de una

irrigación mínima, aunque esto se puede deber a múltiples factores externos al experimento.



Figura 7.28. Las dos probetas de 7,5 cm. de espesor el 13 septiembre 2017. Fuente: autor.

7.2.6 Segundo Experimento: de 25 de octubre 2017 a 30 de agosto 2018 (308 días)

A partir del otoño de 2017 y a la vista de los resultados del primer test realizado ese verano, se decide replantar todas las probetas de nuevo, para poder comparar correctamente los experimentos que se realizarán a partir de entonces.

Durante el proceso de eliminación de la vegetación existente antes de proceder a la replantación, se observa el gran desarrollo radical de los ejemplares que habían sobrevivido al verano, particularmente aquellos que se encontraban en las probetas sin riego artificial.



Figura 7.29. Imágenes de las dos probetas de 7,5 cm. de espesor el 13 de septiembre 2017. Imágenes de las raíces desarrolladas durante el primer período de experimentos por algunos ejemplares a fecha de su eliminación el 24 de octubre de 2017. Fuente: autor.

Para la replantación, se utilizan de nuevo varias de las especies seleccionadas para el experimento inicial y se incorporan algunas nuevas que cuentan teóricamente con más capacidad tapizante y necesidad de espesores de sustrato menor, con el fin de obtener mejores resultados en las probetas menos profundas. Las especies que se eliminan son aquellas que mostraron más dificultades para establecerse en ambos espesores o que tienen menor poder de cubrición, al desarrollarse más en vertical. Las especies seleccionadas para este nuevo experimento se relacionan a continuación:

- *Lygeum Spartum* o Albardín (viveros Muzalé)
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino (viveros Muzalé)
- *Thymus zygis* sub. *Sylvestris* o Tomillo fino (recogida silvestre controlada en Prov. Albacete)
- *Salvia lavandulifolia* (recogida silvestre controlada en Prov. Albacete)
- *Asteriscus maritimus* (viveros Muzalé)
- *Brachypodium retusum* (viveros Muzalé)



Figura 7.30. Fotos de los módulos experimentales el día de su plantación (25 octubre 2017). Fuente: autor.

El objetivo de este segundo experimento es comprobar la supervivencia de las especies seleccionadas bajo estas condiciones de contorno y sometidas a un alto estrés hídrico. Adicionalmente se pretende mejorar el ratio de cobertura de las probetas durante el primer año con el fin de optimizar el cálculo teórico de ahorro energético de estas soluciones, que se encuentra muy ligado al factor de sombra producida por la vegetación.

7.2.6.1 Datos climáticos: del 25 de octubre de 2017 a 30 agosto 2018 (308 días)

Durante el segundo experimento de campo, el más extenso de ellos, que transcurre entre los meses de octubre de 2017 y agosto de 2018, los datos de la estación meteorológica de Murcia arrojan de nuevo, temperaturas medias mensuales superiores a las habituales y precipitaciones algo menores, aunque más cercanas a los valores normales, especialmente de los últimos cinco años.

El episodio más destacado es de nuevo la concentración de precipitaciones elevadas en un único día, el 28 de enero con 36 litros por metro cuadrado, siendo el resto del año bastante seco como norma general.

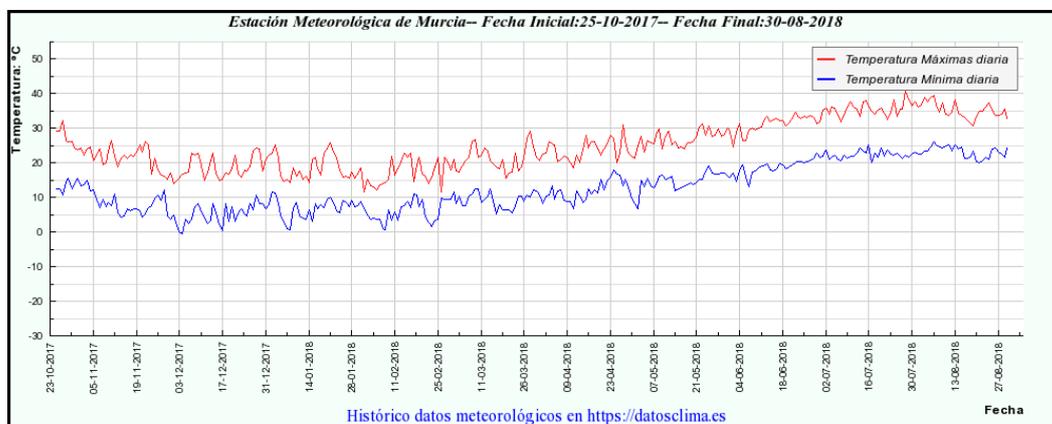


Figura 7.31. Gráfica de Temperaturas medias máximas y mínimas. Datos de AEMET recabados de <https://datosclima.es/Aemet2013/Tempestad2013.php>

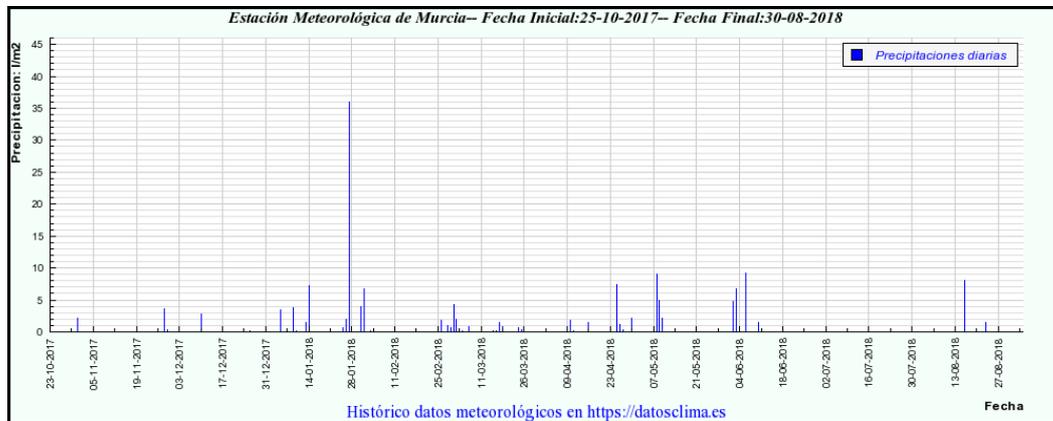


Figura 7.32. Gráfica de precipitación diaria. Datos de AEMET recabados de <https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitastad2013.php>

	Histórico	Año 17-18	Histórico	Año 17-18
	Tª Med °C	Tª Med °C	Pluv. mm	Pluv. mm
nov-17	14,6	14,60	32	6,34
dic-17	11,5	11,10	29	3,04
ene-18	10,6	12,10	27	54,6
feb-18	12,2	11,00	27	13,71
mar-18	14,3	15,20	30	12,69
abr-18	16,5	17,50	25	12,7
may-18	20	20,50	28	18,55
jun-18	24,2	24,70	18	22,34
jul-18	27,2	28,60	3	0
ago-18	27,6	28,40	8	9,39
Período 2	17,9	18,4	227	153,4

Figura 7.33. Tabla comparativa de valores de Temperatura y Precipitación históricos y del período de estudio. Datos recabados de AEMET.

7.2.6.2 Período de experimentación 25/10/2017 a 21/06/2018 (238 días)

Se inicia este segundo experimento también con un período de adaptación inicial de riego, durante la primera semana, aunque en este caso al producirse en otoño, las necesidades de riego artificial son menores.

A continuación, se adapta el riego al régimen de lluvias y se aportan 20L cada dos semanas, siempre y cuando esa semana no se hayan producido precipitaciones abundantes. En total, el riego aportado durante este período es muy reducido y va únicamente encaminado a que la vegetación se encuentre en

un estado aceptable antes del período de sequía prolongado al que se la someterá posteriormente.

TOTAL RIEGO: 0,50 l/m²d

TOTAL PRECIPITACIÓN: 142,60 l/m² total (0,62 l/m²d)

TOTAL: 1,12 l/m²d



Figura 7.34. Las probetas tras un mes de plantación el 20 noviembre 2017. Fuente: autor.

Durante el otoño la vegetación se adapta correctamente al nuevo medio, sin que se observen especies con problemas. Sin embargo, a partir de enero se constata que la mayoría de los esquejes de Salvia y Tomillo no han sobrevivido. Esto puede deberse a que se trata de esquejes trasplantados desde el medio natural que no han podido adaptarse al nuevo sustrato artificial, muy poroso y poco profundo, o simplemente a una mala ejecución de su trasplante. El resto de ejemplares se desarrollan de forma satisfactoria, especialmente aquellos en las probetas más profundas. En este momento se coloca una malla metálica sobre las probetas para evitar que entren animales en su interior y dañen la vegetación existente, puesto que las mismas se encuentran a nivel de suelo.

Durante la primavera el crecimiento de las plantas fue muy reseñable, con varias especies floreciendo y tapizando casi por completo las probetas. Sin embargo, al final de la misma y para el inicio del verano, las plantas empiezan a mostrar síntomas de falta de agua, puesto que las pocas precipitaciones habían desaparecido ya hacía varias semanas y el régimen de riego era muy escaso (0,5 l/m²d).



Figura 7.35. Fotos de las probetas 1 y 3 durante la primavera (10 abril 2018). Fuente: autor.

7.2.6.3 Período de experimento 21/06/2018 30/08/2018 (70 días)

Con el inicio de la estación más cálida y seca, se plantea aumentar el riego artificial hasta completar la falta de agua proveniente de lluvia. De nuevo se decide realizar un único riego por semana con 3,50 l. por probeta, para alcanzar un total de 1,00 l/m²d. En este período las precipitaciones son prácticamente inexistentes y por tanto el único aporte de agua es el proveniente del riego controlado.

TOTAL RIEGO: 1,00 l/m²d

TOTAL PRECIPITACIÓN: 9,40 l/m² total (0,13 l/m²d)

TOTAL: 1,13 l/m²d

Durante este período se observa una mejoría notable en la vegetación de los módulos de 15 cm., con una cobertura prácticamente total y el florecimiento tardío de algunas especies como el *Limonium caesium* que hasta entonces no había desarrollado flores.



Figura 7.36. Floración del *Limonium caesium* el 31 de julio de 2018. Fuente: autor.

Por el contrario, en los módulos de 7,5 cm, que habían perdido un mayor número ejemplares durante el invierno y primavera, el aumento de riego trae consigo la aparición de especies invasoras y anuales que cubren ahora los espacios que habían dejado los esos esquejes, mientras que las especies del experimento no consiguen recuperarse correctamente.

Sin embargo, en las probetas de mayor espesor, apenas aparece ninguna otra planta invasora, ni siquiera en las zonas despobladas, síntoma de que las plantas existentes han extendido su sistema radical incluso por esas zonas no permitiendo ningún otro crecimiento.



Fig. 7.37. Los 4 módulos hacia el final del experimento (31 julio 2018). Fuente: autor.

El día 30/08/2018 concluye esta fase del experimento y se observa claramente que la supervivencia de las especies es satisfactoria para todas aquellas que habían originalmente arraigado de forma correcta en los contenedores de 15cm de profundidad de sustrato.

7.2.7 Tercer Experimento: de 30 de agosto a 28 de diciembre de 2018 (120 días)

A partir del 30 de agosto, los experimentos entran en una nueva etapa, en la que se intentará aprovechar las precipitaciones del otoño para observar si la vegetación podría sobrevivir este tiempo sin riego adicional. En este caso, sólo los dos módulos de mayor profundidad tendrán relevancia, puesto que los de menor sustrato ya no contienen prácticamente ejemplares originales vivos.

7.2.7.1 Datos climáticos: 30/08/2018 a 28/12/2018 (120 días)

El último período de ensayos se produce en el otoño de 2018. En este caso, se trata de un período con valores de temperatura y precipitación bastante similar a las medias históricas, y con una distribución de lluvias más bien homogénea, por lo que se entiende que sus resultados pueden ser comparables a un año estadístico. De la misma forma, este período no produciría variaciones en la clasificación climática de nuestra zona de estudio.

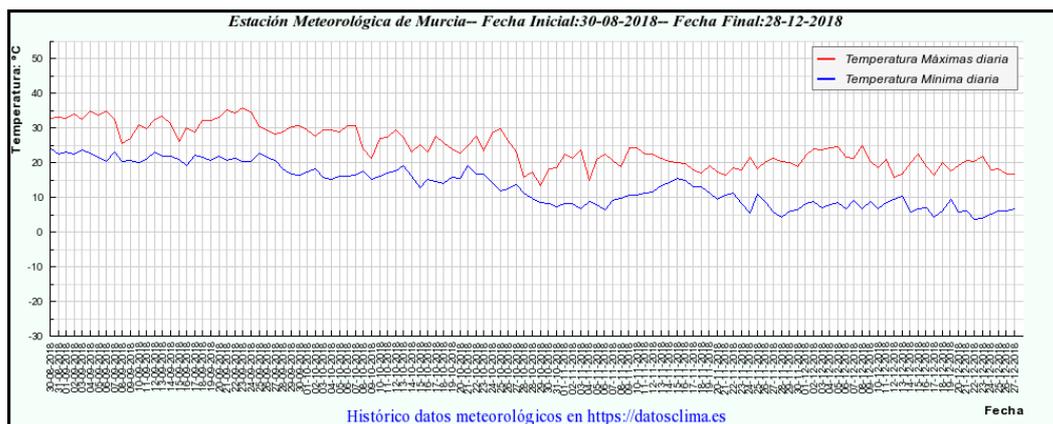


Figura 7.38. Gráfica de Temperaturas medias máximas y mínimas. Datos de AEMET recabados de <https://datosclima.es/Aemet2013/Tempestad2013.php>

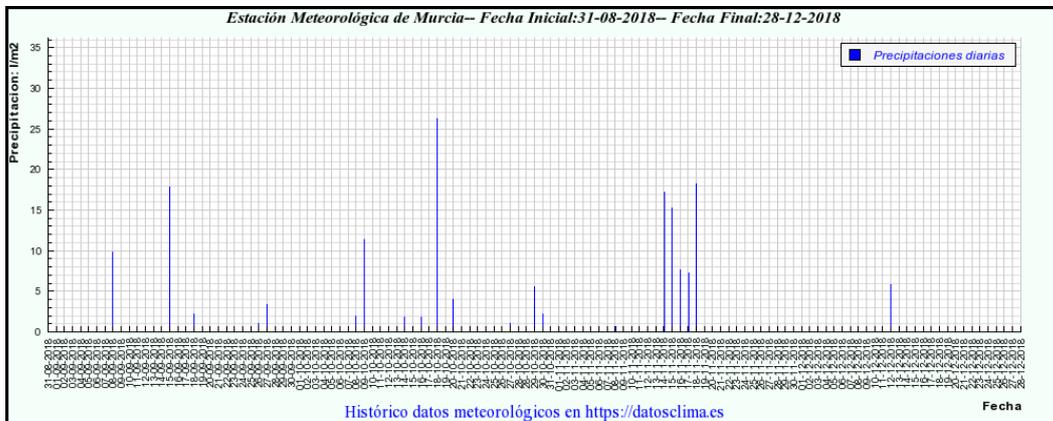


Figura 7.39. Gráfica de precipitación diaria. Datos de AEMET recabados de <https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitastad2013.php>

	Histórico	Otoño 18	Histórico	Otoño 18
	Tª Med °C	Tª Med °C	Pluv. mm	Pluv. mm
sep-18	24,2	25,50	32	35,06
oct-18	19,8	19,40	36	58,49
nov-18	14,6	14,50	32	27,19
dic-18	11,5	12,40	29	6,09
Período 3	17,5	18,0	129	126,8

Tabla 7.13. Tabla comparativa de valores de Temperatura y Precipitación históricos y del período de estudio. Datos recabados de AEMET.

7.2.7.2 Período de experimento 30/08/2018 a 28/12/2018 (120 días)

Esta fase se inicia al final del verano y el día 28 de diciembre se da por concluido el experimento cuyas conclusiones son muy reveladoras. Aquellos ejemplares, sólo pertenecientes a las probetas de mayor espesor, que habían conseguido sobrevivir a los diferentes regímenes hídricos sufridos durante todo el año anterior habían experimentado en este último período un mayor crecimiento y mejorado su ratio de cobertura. Puesto que no se aporta ningún riego artificial, el aporte hídrico se limita a los episodios de lluvias, arrojando el siguiente balance.

TOTAL RIEGO: 0,00 l/m²d

TOTAL PRECIPITACIÓN: 162,40 l/m² total (1,35 l/m²d)

TOTAL: 1,35 l/m²d



Figura 7.40. Las probetas 1 y 3, de 15 cm. de espesor, el 28 diciembre 2018. Fuente: autor.

Por tanto, se infiere que el régimen pluviométrico, con apenas siete episodios relevantes y algún otro muy débil, había sido capaz de aportar toda la irrigación necesaria para el correcto desarrollo de la vegetación durante esos 120 días, a razón de 1,35 l/m²d de media, de lo que se podría concluir que para períodos particularmente secos, valores aproximados de aporte artificial de agua pudieran ser suficientes para, al menos, mantener los ejemplares vegetales en correcto estado.

Como se observa en las imágenes, varias de las especies vegetales que habían presentado partes secas durante la primavera y verano previo, ahora presentan una situación fisiológica mucho más saneada, por lo que se puede afirmar que algunas de estas especies muestran una óptima capacidad de regeneración después de sobrevivir períodos de sequía prolongada.



Figura 7.41. Mismo módulo experimental (número 1) el 1 de junio y 28 de diciembre de 2018. Fuente: autor.

7.2.8 Resultados y discusión

7.2.8.1 Supervivencia y desarrollo vegetal: influencia del riego y espesor de sustrato

Una vez finalizados los dos períodos de experimentos in situ y tras someter a la vegetación a diversos regímenes pluviométricos, es posible extraer algunas conclusiones de este capítulo de estudio.

No obstante, es importante remarcar que los resultados de esta fase concernientes a la vegetación no son ni mucho menos concluyentes. En primer lugar, porque esta etapa no constituye el núcleo principal de investigación de esta tesis, sino un eslabón más en su desarrollo para alcanzar el fin propuesto, que no es otro que dilucidar si la energía que ahorraría en climatización un edificio modelo con una cubierta vegetal supera con creces la cantidad de energía que conlleva su riego. En segundo lugar, se debe a que los experimentos de campo no están enfocados a revelar la idoneidad de una especie vegetal concreta, para lo que se requeriría mayor aislamiento y repetición, sino diseñados para establecer los patrones de riego mínimo que se podrían aplicar a una cubierta verde compuesta por una combinación de distintas especies autóctonas.

Bien es cierto, que al margen de posibles imperfecciones de método debido al escaso número de probetas, sí que es necesario reportar los resultados observados y extraer unas cautelosas conclusiones iniciales de cada una de las especies vegetales.

A continuación se listan las nueve especies autóctonas que han formado parte de los experimentos de campo en alguna de sus fases. Aquellas marcadas en negrita, han sido comunes a ambas etapas:

- *Lygeum Spartum*
- *Limonium Caesium*
- *Thymus zygis sub. Sylvestris*
- *Helichrysum stoechas*
- *Ephedra fragilis*
- *Rosmarinus eriocalix*
- *Salvia lavandulifolia*
- *Asteriscus maritimus*
- *Brachypodium retusum*

En primer lugar, el albardín es una de las especies que ha demostrado un comportamiento más influenciado por el espesor del sustrato y menos por el riego. Mientras que en los módulos experimentales 1 y 3, con 15 cm. de espesor, se ha desarrollado correctamente en todas las condiciones de riego, en aquellos de 7,5 cm. su comportamiento ha sido más dispar, presentando sólo un 37,5% de supervivencia sin un claro patrón en cuanto a la intensidad de riego.



Figura 7.42. Resultados en 7,5 cm. Probeta 2 a 13 septiembre 2017 (izquierda). Probeta 4 a 13 septiembre 2017 (centro). Probeta 2 a 28 de abril 2018 (derecha). Fuente: autor.



Figura 7.43. Resultados en 15 cm. Probeta 3 a 13 septiembre 2017 (izquierda). Probeta 1 a 31 julio 2018 (centro). Probeta 3 a 28 diciembre 2018 (derecha). Fuente: autor.

Por su parte, el *Limonium Caesium* es probablemente la especie con un comportamiento fisiológico más estable en todas las situaciones, consiguiendo sobrevivir incluso en aquellas probetas de 7,5 cm. de espesor en las que no perdura ningún otro ejemplar, tanto en los escenarios sin riego como en los de aporte mínimo. No obstante su crecimiento es relativamente lento, y cómo parece lógico, se desarrolla más profusamente en los espesores de sustrato mayores.



Figura 7.44. *Limonium Caesium*. Ejemplares aún vivos el 13 de septiembre de 2017 en un módulo de 7,5 cm. de espesor (izq.). Ejemplares con gran desarrollo y características flores violeta pálido en 15 cm. de espesor el 1 de junio de 2018 (der.). Fuente: autor.

El caso del tomillo es difícil de evaluar, puesto que en el primer set de pruebas, la mayor parte de los ejemplares en los módulos de menor altura se malograron en fases muy tempranas, no permitiendo la correcta interpretación de los datos. Una posible explicación es la ubicación de las probetas a nivel de suelo y la presencia de animales domésticos en el entorno, algo que se intentó corregir en la segunda fase de pruebas con una malla metálica que cubría las probetas.

Sí es reseñable, sin embargo, el buen desarrollo de los ejemplares que restaron en las probetas más altas, con un notable crecimiento lateral gracias a su carácter procumbente, lo que contribuye a una mejor cobertura del sustrato.



Figura 7.45. *Thymus zygis*. Crecimiento del 19 de junio (izq.) a 2 agosto (centro y der.). Fuente: autor.

Por otro lado, durante la segunda fase de experimentos, los ejemplares de tomillo, en este caso recolectados controladamente de tomillares silvestres de la Provincia de Albacete, se establecen correctamente incluso en los sustratos más delgados con el riego mínimo de 0,5 l/m²d y adquieren incluso una tonalidad más verde que a su trasplante. Sin embargo, para abril de 2018 todos los ejemplares de las cuatro probetas se encuentran completamente secos. Los motivos pueden ser variados, pero puesto que los ejemplares de salvia, también silvestres, desaparecen al mismo tiempo aproximadamente, podría deberse a una incorrecta adaptación de estas especies al sustrato casi por completo mineral o alternativamente a una mayor demanda hídrica, puesto que se trataba de esquejes recolectados en una zona con mayor índice pluviométrico que la ciudad de Murcia.

Del mismo modo, la especie *Salvia lavandulifolia*, se obtiene del medio natural y se trasplanta directamente a los módulos experimentales. En su caso, el tiempo de supervivencia es aún menor al tomillo, por lo que tampoco es posible determinar su nivel de adaptación y necesidad mínima de riego.



Figura 7.46. *Thymus zygis*. 25 octubre, 20 noviembre, 9 enero y 10 abril en módulo 4.

Fuente: autor.



Figura 7.47. *Salvia lavandulifolia*. 25 octubre, 20 noviembre y 9 enero en módulo 4. Fuente: autor.

En cualquier caso, parece claro que investigaciones más extensas serían necesarias para determinar si *Thymus zygis* y *Salvia lavandulifolia* suponen realmente unas especies adaptables a las cubiertas verdes en climas cálidos y cuáles serían sus requisitos de trasplante, sustrato y riego.

A continuación, el *Helichrysum stoechas* presenta un comportamiento variable, sin responder a un patrón claro. Por un lado, haciendo gala de su nombre, algunos ejemplares consiguen retallar en septiembre tras el verano de sequía extrema de 2017 en el módulo de 15 cm. sin riego y en las dos probetas de 7,5 cm. de espesor, tanto en la que mantuvo un riego mínimo como en la que no lo hizo. Sorprendentemente, en la cubierta experimental con 15 cm. de profundidad y riego los ejemplares no dieron signos de desarrollo, mientras que las demás especies en ese módulo habían perdurado en óptimas condiciones.



Figura 7.48. *Helichrysum stoechas*. Ejemplares totalmente secos en módulo 1 con riego (izq.) y brotes nuevos en el módulo 3 sin riego (derecha). Fuente: autor.

Por tanto, debido a que es una planta que seca por completo durante los meses de junio a diciembre y a pesar de haber mostrado unas buenas propiedades de recuperación ya en septiembre en algunos de los módulos, de los resultados de este experimento no se puede afirmar con claridad que el *Helichrysum stoechas* constituya una especie recomendable para su empleo en las azoteas ajardinadas mediterráneas. Por un lado su aspecto marrón y falta de vida resta atractivo a la cubierta durante esos meses. Por otro, el escaso sombreado que genera durante los meses de mayor necesidad parece no compensar su óptima estética y contraste de colores durante la primavera.

Al contrario, las efedras demuestran un buen comportamiento fisiológico en casi todos los casos, obteniendo un crecimiento muy notable, especialmente en los módulos de 15 cm. de espesor. Sin embargo, su desarrollo es sólo vertical, lo que unido a sus ramas finas, tampoco genera excesiva protección frente a la radiación solar, ni tapiza densamente el sustrato para evitar su exposición.



Figura 7.49. *Ephedra fragilis*. Crecimiento vertical en módulo de 15 cm. con riego. Fuente: autor.

Por tanto, su empleo podría circunscribirse a ejemplares aislados para aportar verticalidad entre plantas de porte más bajo, siempre y cuando las distancias de cultivo sean menores a la empleada en este experimento.

La última especie que sólo se utiliza durante la primera fase de pruebas es el *Rosmarinus eriocalix*. Esto se debe principalmente a que demuestra un comportamiento óptimo en casi todos los escenarios y por tanto se considera como muy prometedora, incluso en una fase tan temprana de experimentos.



Figura 7.50. *Rosmarinus eriocalix*. Ejemplar recién trasplantado y estado de los distintos ejemplares a fecha 13 de septiembre 2017. Fuente: autor.

Incluso en el sustrato de menor espesor o en probetas sin riego ni precipitaciones durante 42 días de verano su comportamiento es muy positivo. El crecimiento y frondosidad de esta variedad de romero rastrero lo convierten en un candidato óptimo para cubrir las azoteas verdes en climas cálidos mediterráneos.

En sustitución del *Helichrysum*, se decide utilizar en la segunda fase de experimentación, otra autóctona tapizante de floración amarilla muy llamativa como es el *Asteriscus maritimus*. Su desarrollo y resiliencia es muy notable en todas las condiciones, tanto en los módulos de 15 cm. como en los de únicamente 7,5 cm.

Su crecimiento horizontal es muy agresivo cubriendo rápidamente gran superficie y su floración desde abril hasta bien entrado julio es muy intensa, lo que le confiere unas grandes cualidades estéticas.



Figura 7.51. Los ejemplares de *Asteriscus maritimus* dominan en gran medida las probetas de 7,5 y 15 cm. de espesor durante el mes de abril de 2018. Fuente: autor.

Sin embargo, a partir de junio de 2018, los módulos más finos, donde se habían perdido mayor número de especies, dejan paso a especies invasoras anuales, que poco a poco colonizarán estas dos probetas 2 y 4 eliminando cualquier competencia existente, incluyendo los ejemplares de *Asteriscus*.

En cambio, los módulos de mayor espesor no son invadidos por otras especies y en ellos se puede comprobar la alta capacidad de regeneración de esta especie que junto con sus cualidades tapizantes y estéticas la convierten en una posibilidad muy atractiva para las cubiertas verdes.



Figura 7.52. Mismo ejemplar de *Asteriscus maritimus* el 9 de enero, 10 de abril y 28 de diciembre de 2018. Fuente: autor.

La última especie por evaluar es *Brachypodium retusum*, que ocupa ahora el lugar de las efedras en un intento de tapizar por completo el sustrato con una especie más densa y de crecimiento más rápido y lateral.

Los resultados con esta variedad vegetal son espectaculares. Su crecimiento desde octubre de 2017 hasta enero de 2018 es ya muy notable, pero es especialmente la primavera, en la que se produce su floración de espigas, el período de máximo apogeo de los ejemplares.

Si bien su expansión es correcta en todos los módulos, aquellos con mayor profundidad permiten mayor volumen de planta. Esto se puede deber a su superior capacidad de acumulación de agua, la mejor protección térmica que confieren a las raíces o simplemente a la mayor disponibilidad de espacio para el desarrollo de las mismas.

Además su capacidad de resistir las sequías prolongadas y reverdecer con las primeras lluvias, junto con su evidente densidad y carácter tapizante, hacen de esta especie una candidata muy prometedora para su empleo en cubiertas verdes que precisen de un buen sombreadamiento y de una capa de aire intermedio que sirva de aislamiento entre el ambiente exterior y el cerramiento horizontal del edificio.



Figura 7.53. *Brachypodium retusum*. Crecimiento y regeneración a 25 octubre de 2017, 9 enero, 10 abril y 28 de diciembre de 2018. Fuente: autor.

7.2.8.3 Ratios de riego obtenidos

Bien es cierto que, aunque no son suficientes, estos datos obtenidos a lo largo de los diversos períodos de experimentos sí permiten establecer unos ratios aproximados de riego mínimo necesario para el correcto desarrollo de las diversas especies vegetales seleccionadas.

En concreto, a la vista del resultado de sumar los ratios de riego artificial y precipitaciones para cada período en los que la vegetación se ha desarrollado correctamente o al menos ha sobrevivido (1,01, 1,12, 1,13 y 1,35 l/m²*día) se observa que un aporte total de agua, lluvias más riego, de aproximadamente 1-1,20 l/m²*día podría ser suficiente para la implementación de cubiertas vegetales con vegetación autóctona en climas semi-áridos como el de la Región de Murcia.

Además, cabe destacar que, por razones logísticas, el riego aplicado en estos experimentos no ha seguido pautas de máxima eficiencia con lo que cabría esperar mejoras, aunque fueran marginales si se aplicasen algunas de esas recomendaciones. El riego por goteo o por capilaridad, su aplicación en horario nocturno, la medición automática de la humedad del sustrato para evitar riegos con el sustrato saturado o la conexión a centrales meteorológicas podrían mejorar la eficiencia y reducir adicionalmente el consumo de agua.

Si tenemos en cuenta que la precipitación anual media de la ciudad de Murcia durante los últimos cinco años ha sido de 251,2 l/m²*año y durante los anteriores 35 de 293,0 l/m²*año, podríamos estimar que la necesidad de riego artificial de una cubierta de estas características oscilaría entre 72 y 261,5 l/m²*año, en función de si se tratase de un año con un acumulado de lluvia más o menos escasa, según los datos disponibles:

LLUVIA MEDIA ANUAL (1982-2012)³⁰ = 293,0 l/m²

LLUVIA MEDIA ANUAL (2014-2018)³¹ = 251,2 l/m²

³⁰ Obtenido de: <https://es.climate-data.org/europe/espana/region-de-murcia/murcia-3214/>

³¹ Obtenido de: <https://datosclima.es/Aemet2013/Precipitastad2013.php>

	Necesidades hídricas totales (l/m ² a)	Precipitación (l/m ² *a)	Necesidad Riego (l/m ² *a)
Año 2017	365d*1,20 l/m ² d= 438	176,5	261,5 (Escenario 1)
	365d*1,00 l/m ² d = 365	176,5	188,5 (Escenario 2)
Año 2018	365d*1,20 l/m ² d = 438	270,8	167,2 (Escenario 3)
	365d*1,00 l/m ² d = 365	270,8	94,2 (Escenario 4)
Años con precipitación baja (2014-2018)	365d*1,20 l/m ² d = 438	251,2	186,8
	365d*1,00 l/m ² d = 365	251,2	113,8
Años con precipitación media (1982-2012)	365d*1,20 l/m ² d = 438	293,0	145,0
	365d*1,00 l/m ² d = 365	293,0	72,0

Tabla 7.14. Escenarios de riego en función de la climatología anual teniendo en cuenta dos intensidades hídricas distintas, entre 1,00 y 1,20 L/m² al día. Fuente: elaboración propia.

Este aporte adicional de agua de la red podría incluso ser menor si se implementara un sistema de reciclaje de agua, bien por recogida y almacenamiento de lluvia para aquella porción que la cubierta no sea capaz de almacenar en los episodios de precipitaciones más intensas, bien por reutilización de aguas grises del edificio. Por razones logísticas, esta captación no ha sido posible implementarla en nuestras probetas, pero se evalúa igualmente la eficacia que pudiera tener la medida.

7.2.8.4 Recogida y reutilización del agua de lluvia

Numeroso autores como Ascione et al. (2013), proponen un sistema para recoger el agua sobrante de lluvia y reutilizarla para riego en épocas más secas, reduciendo así el aporte de riego artificial anual y evitando desperdiciar agua de buena calidad.

Es bien cierto, que esto pudiera suponer un ahorro en términos hídricos y tal vez económicos y energéticos, sin embargo, según los autores, aun así habría que tener en cuenta otros factores como el coste de instalación de este sistema, el mantenimiento de la instalación (tuberías, bombas, etc.) y la energía auxiliar

necesaria. Por otro lado esta agua no debería estar almacenada más de 3 semanas por motivos higiénicos a menos que se trate con sustancias antibacterianas para evitar la proliferación de bacterias y hongos que pueden ser perjudiciales para la salud humana y la propia instalación, por lo que los costes de mantenimiento se podrían ver incrementados.

Estas mismas ideas se recogen también en otros estudios, que investigan la posibilidad de almacenar el agua en la misma cubierta vegetal, convirtiéndola por tanto en una cubierta-aljibe. En este caso el mecanismo de autoabastecimiento de la cubierta por capilaridad y evapotranspiración evitaría la necesidad de utilizar medios mecánicos (Neila et al. 2008).

Este mismo principio se ha utilizado parcialmente en las cubiertas experimentales del presente estudio, a través del diseño de las probetas con las salidas de evacuación del agua sobrante ligeramente por encima de la capa de estanqueidad y el uso de una lámina de retención de agua en combinación con una lámina de nódulos que permite la retención de más volumen de agua y la evaporación del agua del depósito a través de las perforaciones superiores. De esta forma, se pretende maximizar el uso del agua sobrante de lluvia, aunque un sistema de recogida y aporte controlado hubiera resultado, con toda probabilidad, más eficiente.



Figura 7.54. Salidas de evacuación del agua sobrante de los módulos a escala de cubierta vegetal. Fuente: autor.

7.3 ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÍA / AGUA

Una vez se han llevado a cabo los estudios de reducción de la demanda energética y se ha establecido el balance hídrico de la cubierta verde modelo, se desarrolla a continuación, la fórmula comparativa propuesta como base para clasificar, a través de un enfoque distinto al convencional, las cubriciones vegetales en zonas cálidas y semi-áridas.

$$\text{Clasificación de cubiertas por eficiencia} = \frac{\text{Uso de agua}}{\text{Ahorro energético}}$$

El objetivo de esta fórmula es el de superar las clasificaciones tradicionales por espesor de sustrato o intensidad de mantenimiento y evaluar de manera sencilla y directa la eficiencia energética global de las distintas soluciones de azoteas ajardinadas. Se trata básicamente de relacionar cuanta energía se consume para aportar agua de riego a la cubierta, por cada kWh/m²a de energía que se ahorra en climatizar los edificios que las albergan. Con ello, se consiguen traducir a valores porcentuales los datos energéticos e hídricos, expresados ambos en términos de kWh/m²a.

7.3.1 Resumen de resultados teóricos y empíricos

En primer lugar, recogemos los datos obtenidos de nuestro estudio, tanto las simulaciones dinámicas por ordenador para el edificio tipo como los de la fase experimental con las probetas con vegetación autóctona.

	EDIFICIO TIPO			
	SIN AISLAMIENTO		PASSIVHAUS	
	A	B	C	D
DEMANDA CLIMATIZACIÓN Kwh/m ² a	114,9	104,02	26,09	24,16
reducción %		-9,47%		-7,40%
reducción Kwh/m ² a		10,88		1,93

Tabla 7.15. Reducción de la demanda de climatización en edificios poco aislados y construcciones Passivhaus al sustituir sus cubiertas planas convencionales (A y C) por una azotea verde (B y D). Fuente: elaboración propia según resultados de cálculo.

	Necesidades hídricas totales (L/m ² *año)	Precipitación (L/m ² *año)	Necesidad Riego (L/m ² *año)
Año 2017	365d*1,20 L/m ² d= 438	176,5	261,5 (Escenario 1)
	365d*1,00 L/m ² d= 365	176,5	188,5 (Escenario 2)
Año 2018	365d*1,20 L/m ² d= 438	270,8	167,2 (Escenario 3)
	365d*1,00 L/m ² d= 365	270,8	94,2 (Escenario 4)

Tabla 7.16. Cuatro posibles escenarios de necesidad de aporte de riego anual para los años 2017 y 2018, bajo dos hipótesis de necesidades hídricas totales, entre 1,00 y 1,20 l/m² al día de media, incluyendo el riego y las precipitaciones. Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de comparar estos datos en términos energéticos, transformamos a continuación los litros de agua de riego en la energía equivalente utilizada para su captación, tratamiento y transporte hasta el punto de uso. Para ello emplearemos los coeficientes medios de paso, recogidos en el Capítulo 5, donde se evaluaba la huella energética del agua.

En concreto para este caso, según las estimaciones del Ente Público del Agua de la Región de Murcia, los consumos energéticos de los diferentes procesos en el ciclo urbano del agua en esta área son los siguientes:

INTENSIDAD ENERGÉTICA CICLO DEL AGUA MURCIA	Consumo específico (KWh/m ³)
Captación de Aguas superficiales	1.1
Desalación	4.2
Distribución: impulsiones y bombeos	0.8
MEDIA PRODUCCIÓN + DISTRIBUCIÓN	2.83

Tabla 7.17. Intensidad energética en las distintas fases del ciclo del agua en la Región de Murcia. Fuente: elaboración propia basada en Garrido, A. 2007.

En la siguiente tabla se calculan los consumos de energía que supone el empleo de agua en los distintos escenarios de riego planteados, según la aridez del año en cuestión. Se estudian los años 2017 y 2018, puesto que son los correspondientes a las fases experimentales de este trabajo con probetas reales, pero además porque constituyen tal vez los dos ejemplos más significativos de

acumulados pluviométricos. Por un lado, el 2017 fue un año de gran sequía, con una precipitación anual bastante por debajo de la media, aunque se trata de un fenómeno que posiblemente se presente con mayor recurrencia en el futuro. Por otro, el 2018 se acerca mucho más a la tendencia estadística a medio y largo plazo y representa mejor una situación climática más habitual.

Necesidad Riego (l/m ² a)	Consumo energético Unitario (kWh/l)	Consumo energético Total (kWh/m ² a)
261,5 (Esc 1)	0,00238	0,62
188,5 (Esc 2)	0,00238	0,44
167,2 (Esc 3)	0,00238	0,39
94,2 (Esc 4)	0,00238	0,22

Tabla 7.18. Consumo energético equivalente del agua empleada para riego en los cuatro escenarios hídricos propuestos. Fuente: elaboración propia basada en Garrido, A. 2007.

7.3.2 Fórmula propuesta: Índice de Eficiencia Hidro-Energética

Por consiguiente, una vez conocidos todos los factores, se puede determinar el factor, que denominaremos Índice de Eficiencia Energética de las cubriciones vegetales para cada uno de los escenarios, con el que proponemos clasificar las cubiertas ecológicas en función de su eficiencia hidro-energética global. Con el fin de obtener un valor porcentual, la fórmula se desarrolla como sigue:

$$\text{Índice Eficiencia Hidro-Energética} = 1 - \frac{\text{Consumo energía de riego (kWh/m}^2\text{a)}}{\text{Ahorro energía cubierta verde (kWh/m}^2\text{a)}} \times 100$$

Los porcentajes que se obtienen finalmente en estas tablas permiten hacerse una idea aproximada de cómo de efectiva es la aplicación de una cubierta verde a un edificio tipo y expresan numéricamente si la energía ahorrada en climatización se verá o no contrarrestada por la energía embebida en el agua de riego.

Una efectividad del 100% significaría que el riego no es necesario, o no consume energía, y por lo tanto que la cubierta vegetal aporta todos los beneficios posibles a la construcción, sin ninguna desventaja. Por el contrario,

valores próximos a cero o negativos, supondrían que al incorporar una azotea ajardinada al edificio, su consumo energético global es similar o incluso superior a su estado anterior, lo que llevaría a desaconsejar el empleo de estas soluciones, al menos desde el punto de vista estrictamente energético.

7.3.3 Propuesta de Clasificación Hidro-Energética para las cubiertas ecológicas

A partir de la aplicación de la fórmula propuesta, se podría obtener una nueva clasificación de las cubriciones vegetales para zonas cálidas y secas como el Mediterráneo, donde la escasez de agua resulta un factor determinante en su elección, en función de su eficiencia Hidro-Energética.

Índice de Eficiencia Hidro-Energética (%)	Clase de cubierta ecológica
90-100	Cubierta ecológica "Premium"
70-90	Cubierta ecológica "Plus"
50-70	Cubierta ecológica "Classic"
< 50	Solución no recomendada

Tabla 7.19. Clasificación de las cubiertas ecológicas en zonas cálidas y semi-áridas en función de su Eficiencia Hidro-Energética. Fuente: elaboración propia.

Es importante remarcar que la agrupación de valores porcentuales aquí propuesta es completamente arbitraria y no obedece a ninguna consideración energética ni socio-económica y que su distribución bien podría ser distinta.

Sin embargo, sí que intenta reflejar lo que a nuestro juicio se debería intentar obtener de una cubrición vegetal ejecutada con un propósito energético, en una zona seca y cálida como es el Mediterráneo.

Entendemos que valores que superen aproximadamente el 50% de efectividad podrían ser justificables en estas regiones, puesto que representan ahorros en climatización de los edificios de al menos dos veces el consumo energético del agua de riego.

Entornos inferiores al 50% entendemos que no son justificables, desde el punto de vista estrictamente energético, en el contexto de zonas con problemas

crónicos de escasez de agua, puesto que emplean un recurso muy valioso como es el agua para obtener finalmente unos ahorros energéticos globales muy moderados.

Consideramos que en los casos de bajos valores de efectividad, bien se debería optimizar la solución de cubierta para mejorar su Índice de Eficiencia Hidro-Energética o bien se recomendaría la utilización de técnicas diferentes que reduzcan el consumo energético del edificio sin necesidad de aportes de agua.

Adicionalmente, a pesar de que a priori el ahorro energético aún siga arrojando un resultado positivo, porcentajes muy reducidos de este Índice, podrían suponer en la práctica consumos superiores, puesto que la fórmula propuesta no considera otros gastos energéticos que podrían ir asociados a una cubierta verde como serían los derivados de los procesos de mantenimiento, equipos de riego, entre otros.

7.3.4 Cálculo de Eficiencia Hidro-Energética de la cubierta propuesta

Consecuentemente, los Índices de Eficiencia Hidro-Energética global que se obtendrían para las cubiertas vegetales propuestas en este estudio, teniendo en cuenta los distintos escenarios de riego que se han extrapolado de las fases experimentales con probetas durante 2017 y 2018, serían los que se muestran en las tablas siguientes.

EDIFICIO TIPO B (sin aislamiento)				
Escenarios Necesidad Riego (l/m ² a)	Ahorro energético cubierta verde (kWh/m ² a)	Consumo energético riego (kWh/m ² a)	Índice de Eficiencia Hidro-Energética (%)	Clase de cubierta ecológica
Esc 1 (261,5)	10,88	0,62	94,30	“Premium”
Esc 2 (188,5)	10,88	0,44	95,95	“Premium”
Esc 3 (167,2)	10,88	0,39	96,41	“Premium”
Esc 4 (94,2)	10,88	0,22	97,97	“Premium”

Tabla 7.20. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio poco aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados. Fuente: elaboración propia.

EDIFICIO TIPO D (Passivhaus o equivalente)				
Escenarios Necesidad Riego (l/m ² a)	Ahorro energético cubierta verde (kWh/m ² a)	Consumo energético riego (kWh/m ² a)	Índice de Eficiencia Hidro-Energética (%)	Clase de cubierta ecológica
Esc 1 (261,5)	1,93	0,62	67,87	“Classic”
Esc 2 (188,5)	1,93	0,44	77,20	“Plus”
Esc 3 (167,2)	1,93	0,39	79,79	“Plus”
Esc 4 (94,2)	1,93	0,22	88,60	“Plus”

Tabla 7.21. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio muy aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados. Fuente: elaboración propia.

Para los dos hipotéticos edificios que se han modelizado en DesignBuilder en este trabajo, tradicional sin aislamiento y construcción bajo estándar Passivhaus, los resultados son dispares.

Por un lado, en el caso de un edificio con muy poco aislamiento, el índice de eficiencia obtenido de aplicar una cubierta verde es muy alto, entre 94 y 97%. Esto se debe a que el ahorro energético en climatización que aportaba esta solución era numéricamente alto, 10,88 kWh/m²a, con lo que el consumo energético en agua de riego suponía un porcentaje muy pequeño respecto del total.

Es por tanto perfectamente lógico afirmar que los beneficios, en términos de energía, que las cubriciones vegetales aportan a los edificios con escaso aislamiento superan muy significativamente a los posibles consumos derivados del agua de riego.

Por otro lado, para edificios muy aislados, como son aquellos que cumplen el estándar Passivhaus, el índice de eficiencia que resulta de incorporar una azotea vegetal es ligeramente inferior, oscilando entre el 67 y el 88%, en función de cada escenario de intensidad de riego. En este caso, aunque los hipotéticos consumos de agua son exactamente iguales, los ahorros energéticos que se obtenían en climatización eran más moderados en términos absolutos, 1,93 kWh/m²a, y por tanto la repercusión de la energía embebida en el riego es más notable.

Aun así cabe afirmar, que también en este caso, los ahorros energéticos en climatización que supone la instalación de una cubierta verde en un edificio

Passivhaus bien aislado, superan de manera importante a la energía consumida en captar, tratar y transportar el agua empleada para su irrigación.

Adicionalmente, para ambos escenarios, es importante remarcar que con independencia del balance energético netamente positivo, tal y como se ha comprobado en esta investigación, que arrojan estas soluciones constructivas, está también ampliamente demostrado que las cubiertas vegetales aportan a los edificios y al entorno urbano una serie de beneficios no tan fácilmente cuantificables, pero no por ello menos relevantes.

VIII – CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

VIII CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De las consideraciones recogidas a lo largo de este trabajo de investigación, en combinación con los experimentos informáticos y a escala real llevados a cabo durante los años 2017 y 2018, podemos extraer, una serie de conclusiones y recomendaciones para futuros estudios sobre la materia.

En primer lugar, parece suficientemente probado, que las cubiertas verdes, como sistema constructivo en el más amplio sentido, aportan una serie de beneficios, tanto cualitativos como cuantitativos, a los edificios y su entorno.

Por un lado, atendiendo a la literatura consultada, las azoteas vegetales aportan a las ciudades y a la sociedad en general mejores condiciones climáticas y de calidad de vida, reduciendo el efecto de isla de calor, contribuyendo a la biodiversidad, filtrando parte de la polución ambiental, reduciendo la incidencia de las lluvias torrenciales sobre los sistemas de evacuación de aguas, aminorando los picos de consumo de energía o absorbiendo parte del ruido que se genera en las zonas urbanas.

Por otro lado, también aportan beneficios difícilmente cuantificables como una mejora de la estética de las construcciones o la provisión de espacios adicionales para la recreación e incluso la agricultura urbana, lo que podría, en algunos casos, redundar también en utilidades económicas.

Por último, tal y como se ha demostrado en esta tesis, las cubriciones vegetales pueden aportar a los edificios ahorros energéticos en términos absolutos y mejores condiciones de confort interior para sus usuarios durante la fase de ocupación de los mismos.

De hecho, se ha comprobado que las cubiertas verdes, en sus múltiples variedades, constituyen una herramienta arquitectónica bioclimática utilizada desde hace siglos, por su capacidad de aislamiento en épocas frías y refrescamiento pasivo en verano, además de como elemento estético y de recreación.

Sin embargo, se ha constatado que las dificultades de implantación de esta técnica tradicional a los edificios contemporáneos, con sus consiguientes condicionantes tecnológicos y socioeconómicos, se deben en muchos casos a un exceso de estandarización de las soluciones. Este fenómeno se ha visto acentuado especialmente en zonas cálidas y secas, puesto que la mayor parte de la investigación realizada hasta la fecha sobre azoteas verdes contemporáneas se ha llevado a cabo en zonas de climas fríos y templados, donde el clima favorece en cierta medida el correcto desarrollo de la vegetación, elemento fundamental para el éxito de una cubierta ecológica.

Por tanto, es preciso afirmar que el empleo de soluciones estandarizadas que no hayan sido específicamente probadas en el clima de una región en concreto, puede conllevar necesidades de riego y mantenimiento no esperadas e incluso comprometer el éxito o los efectos positivos esperados de su aplicación.

Está comprobado que su empleo en zonas cálidas y áridas no sólo es viable, sino también muy positivo, pero requiere de investigación y rigor científico a la hora de seleccionar o modificar los desarrollos existentes en el mercado con el fin de adaptar la solución a las condiciones climáticas de cada zona geográfica.

Tal y como se ha demostrado en este trabajo, los parámetros más relevantes que debe incluir este estudio de viabilidad serían la selección acertada de la tipología de cubierta y de las especies vegetales a emplear.

No obstante, los sistemas de clasificación tipológica actuales, basados en el grado de mantenimiento o en el espesor de sustrato, no responden a estas necesidades y se hace necesario proponer una nueva escala para medir la idoneidad de las cubiertas ecológicas en climas cálidos y secos como el Mediterráneo, donde el consumo de agua para riego puede suponer un condicionante fundamental.

En este sentido, se ha comprobado que el empleo de agua para riego supone, no sólo la utilización de un recurso escaso en muchas regiones del planeta, sino también un gasto energético asociado. Este consumo podría, por tanto, contrarrestar los ahorros en climatización obtenidos en los edificios a raíz de instalar una cubierta verde y convertir esta solución en ineficaz, al menos desde el punto de vista de la energía.

Consecuentemente, se hace necesario, determinar la huella energética del agua en cada localización, con el objetivo de poder establecer una comparación

real del balance energético de los edificios antes y después de incluir una cubierta vegetal. Para nuestro caso de estudio, se han empleado los datos de energía embebida en el agua de consumo urbano proporcionados por organismos oficiales la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia. En el caso de su aplicación en otros ámbitos geográficos, se deberían tomar valores locales propios o en su defecto los valores de medias regionales o nacionales que ofrecen muchas instituciones tanto españolas, como internacionales.

Respecto a la elección de la tipología de cubierta más adecuada para los climas cálidos, se ha comprobado que existen soluciones viables para los dos casos más comunes, rehabilitación y obra nueva, aunque sus espesores pueden variar en función del tipo de vegetación que se desee emplear, entre otros condicionantes.

En cualquier caso, se puede afirmar que las tipologías más adecuadas en clima Mediterráneo son aquellas que permiten un correcto drenaje combinado con una retención de agua muy significativa, para que la precipitación recogida en los episodios más intensos se pueda aprovechar y distribuir más uniformemente a lo largo del tiempo, evitando su vertido a las redes de evacuación y permaneciendo de esta forma disponible para la vegetación durante períodos lo más extensos posible. Los métodos para lograr este fin son muy variados, y comprenden desde capas de acumulación de lluvia formadas por elementos industrializados, sustratos de materiales muy porosos que retienen gran cantidad de agua en sus oquedades, hasta compuestos químicos súper absorbentes como el hidrogel.

En cuanto a la selección del material vivo de las cubiertas, en climas cálidos y semiáridos, es fundamental la selección de especies vegetales resistentes a la sequía y a las condiciones climáticas extremas que tienen lugar en las azoteas.

Para la presente investigación, y conforme recomiendan diversas publicaciones científicas, se ha optado por seleccionar especies vegetales autóctonas por encontrarse, teóricamente, mejor adaptadas a los rigores de la climatología murciana, además de contribuir a reponer el medio natural modificado por la acción urbanizadora del hombre.

Por consiguiente, durante la fase experimental de este estudio se han empleado fundamentalmente especies previamente identificadas durante las

visitas de campo realizadas a tres localizaciones distintas de la Región de Murcia, en concreto las nueve siguientes:

- *Lygeum Spartum*
- *Limonium Caesium*
- *Thymus zygis* sub. *Sylvestris*
- *Helichrysum stoechas*
- *Ephedra fragilis*
- *Rosmarinus eriocalix*
- *Salvia lavandulifolia*
- *Asteriscus maritimus*
- *Brachypodium retusum*

Algunas de estas especies autóctonas se presentan como candidatas prometedoras para las azoteas vegetales en clima cálido y llegar a una mayor concreción de su idoneidad participa de líneas de investigación futuras que se derivan de este estudio.

En particular, los ejemplares empleados a lo largo de todos los períodos de experimentación pertenecientes a las especies *Lygeum Spartum*, *Limonium Caesium*, *Rosmarinus eriocalix*, *Asteriscus maritimus* y *Brachypodium retusum*, son los que obtuvieron mejores resultados tanto de ratios supervivencia a la sequía prolongada, como de estado fisiológico anual, crecimiento, tapización, regeneración y mayores valores estéticos.

Conforme a la literatura científica y a las pruebas de campo realizadas, se puede afirmar que durante las primeras etapas de establecimiento de la vegetación y con el fin de generar una cobertura total del sustrato, un aporte regular de agua, aunque sea mínimo, parece necesario. Este aporte, podría ocurrir bien a través de la precipitación atmosférica, bien a través de riego, en función de la época del año en la que se realice la instalación de la cubierta y de las variables meteorológicas durante ese período.

En el caso de consumo de agua destinada a riego, se realiza una hipótesis con la posibilidad de reducir o incluso eliminar este aporte, tal y como recogen algunos autores. La estimación, en concordancia con esos estudios, es que esto no sería posible durante los dos primeros años de vida de la cubrición vegetal.

Por tanto, la replicación de estudios a largo plazo, como los realizados por Rowe et al. (2012) en otros climas más templados, se convierte en fundamental

para comprender mejor el comportamiento a medio y largo plazo de la vegetación en las azoteas ajardinadas en el mediterráneo.

Aun así, los resultados obtenidos en los experimentos de campo llevados a cabo en esta investigación, reflejan que, incluso para los primeros meses desde la instalación, las necesidades hídricas totales de la vegetación seleccionada, son muy reducidas. Se constata además que este valor, equivalente a la precipitación recibida junto con el riego aportado, oscilaría entre 1,00 y 1,20 l/m²d, y podría ser suficiente para la exitosa implementación de cubiertas verdes con vegetación autóctona en climas semi-áridos como el de la Región de Murcia.

	Necesidades hídricas totales (l/m ² a)	Precipitación (l/m ² *a)	Necesidad Riego (l/m ² *a)
Año 2017	365d*1,20 l/m ² d= 438	176,5	261,5 (Escenario 1)
	365d*1,00 l/m ² d = 365	176,5	188,5 (Escenario 2)
Año 2018	365d*1,20 l/m ² d = 438	270,8	167,2 (Escenario 3)
	365d*1,00 l/m ² d = 365	270,8	94,2 (Escenario 4)
Años con precipitación baja (2014-2018)	365d*1,20 l/m ² d = 438	251,2	186,8
	365d*1,00 l/m ² d = 365	251,2	113,8
Años con precipitación media (1982-2012)	365d*1,20 l/m ² d = 438	293,0	145,0
	365d*1,00 l/m ² d = 365	293,0	72,0

Tabla 8.01. Escenarios de riego en función de la climatología anual teniendo en cuenta dos intensidades hídricas distintas, entre 1,00 y 1,20 L/m² al día. Fuente: elaboración propia.

Teniendo en cuenta que los datos de necesidades hídricas absolutas varían entre 1,00 y 1,20 l/m²d y en función de la distinta climatología anual, la necesidad de riego con agua urbana podría suponer valores que irían desde los 0,71 l/m²d, en años de fuerte sequía, hasta cuantías tan bajas como 0.19 l/m²d, lo que supondría una mejora sustancial con respecto a la mayor parte de autores consultados.

Además, cabe destacar que, los valores de irrigación obtenidos pudieran no ser los más ajustados posibles, puesto que, en esta investigación, por motivos de logística, no se han aplicado pautas de máxima eficiencia hídrica, tales como el riego por goteo, su aplicación en las horas más frescas del día, las mediciones automáticas de la humedad del sustrato o el pronóstico de los acontecimientos meteorológicos integrado en la gestión del riego.

Adicionalmente, como se ha desarrollado en el capítulo previo, parte de estas necesidades hídricas se podrían satisfacer mediante agua reciclada, bien de almacenar las precipitaciones en los episodios más extremos, bien de reutilizar el agua de otras funciones del edificio.

No obstante, en el presente estudio se ha trabajado bajo la hipótesis más conservadora y se considera que los aportes de agua se realizan con agua potable, que es la de mayor intensidad energética.

Aun bajo esta premisa, al añadir al edificio modelo la cubierta vegetal seleccionada, el balance energético global es netamente positivo, el confort interior es superior y adicionalmente se obtendrían múltiples beneficios a nivel urbano.

Esta afirmación es el resultado de evaluar, por un lado, las mejoras en la eficiencia energética que las cubiertas verdes generan en los edificios y, por otro, de restar a estos ahorros, el consumo energético derivado del uso de agua potable para riego que se detalla a continuación.

Necesidad Riego (l/m ² a)	Consumo energético Unitario (kWh/l)	Consumo energético Total (kWh/m ² a)
261,5 (Esc 1)	0,00238	0,62
188,5 (Esc 2)	0,00238	0,44
167,2 (Esc 3)	0,00238	0,39
94,2 (Esc 4)	0,00238	0,22

Tabla 8.02. Consumo energético equivalente del agua empleada para riego en los cuatro escenarios hídricos propuestos. Fuente: elaboración propia.

A modo de resumen de lo expuesto en el capítulo anterior, las reducciones de demandas energéticas que aporta la azotea vegetal propuesta son las siguientes, en función del nivel de aislamiento con que cuente el edificio modelo.

	A	B	C	D
DEMANDA TOTAL Kwh/m2a	250,45	237,95	188,91	183,04
reducción %		-4,99%		-3,11%
DEMANDA CALEFACCIÓN Kwh/m2a	101,99	96,06	7,04	6,32
reducción %		-5,81%		-10,23%
		5,93		0,72
DEMANDA REFRIGERACIÓN Kwh/m2a	12,91	7,96	19,05	17,84
reducción %		-38,34%		-6,35%
		4,95		1,21
DEMANDA CLIMATIZACIÓN Kwh/m2a	114,9	104,02	26,09	24,16
reducción %		-9,47%		-7,40%
		10,88		1,93
PÉRDIDAS CUBIERTA W/m2	-39,23	-13,23	-2,73	-2,23
reducción %		-66,28%		-18,32%

Tabla 8.03. Resumen de ahorros energéticos por tipo de edificio. Fuente: elaboración propia según resultados de cálculo.

Los resultados de este apartado del trabajo demuestran que las cubiertas verdes en el clima semi-árido Mediterráneo consiguen disminuir la demanda de energía de los edificios, bajo todas las hipótesis de estudio.

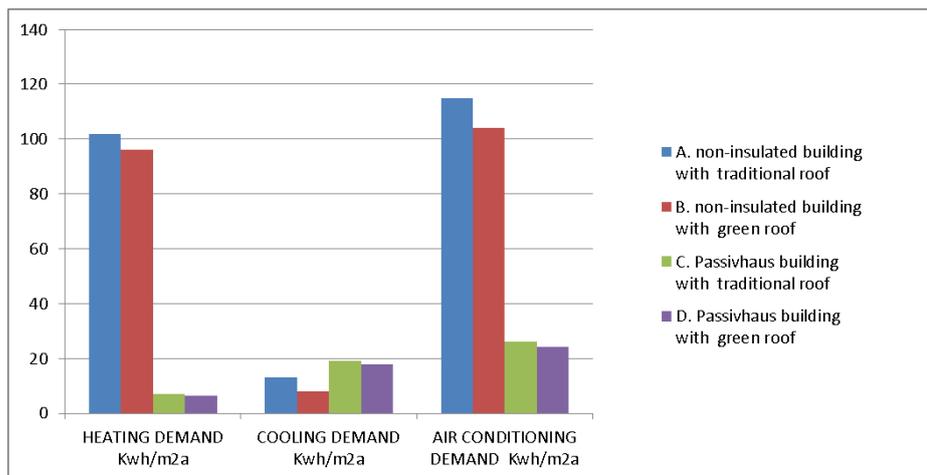


Figura 8.01. Demandas de calefacción, refrigeración y climatización para las diferentes soluciones adoptadas. Fuente: elaboración propia.

Tal y como se extrae de las simulaciones dinámicas realizadas con el software de cálculo DesignBuilder, la demanda total de climatización anual para el caso de edificios sin aislamiento se reduciría en torno al 9.5% al añadir una cubierta vegetal, mientras que en aquellos equivalentes al estándar Passivhaus, la reducción energética alcanzaría el 7.4%.

	EDIFICIO TIPO			
	SIN AISLAMIENTO		PASSIVHAUS	
	A	B	C	D
DEMANDA CLIMATIZACIÓN Kwh/m2a	114,9	104,02	26,09	24,16
reducción %		-9,47%		-7,40%
reducción Kwh/m2a		10,88		1,93

Tabla 8.04. Reducción de la demanda de climatización en edificios poco aislados y construcciones Passivhaus al sustituir sus cubiertas planas convencionales (A y C) por una azotea verde (B y D). Fuente: elaboración propia según resultados de cálculo.

8.2 FÓRMULA PROPUESTA: ÍNDICE DE EFICIENCIA HIDRO-ENERGÉTICA

Una vez se conocen los dos factores energéticos fundamentales que hemos considerado en el balance global de energía de los edificios, tras ser convertidos a unidades equivalentes, y por tanto, fácilmente extrapolables a cualquier clima y solución constructiva, se propone generar una nueva clasificación de cubiertas ecológicas para climas cálidos en función de su eficiencia hidro-energética, emplazando además a otros autores a emplearla como base de comparación en investigaciones futuras.

Esta clasificación estará organizada por el que denominaremos Índice de Eficiencia Hidro-Energética de las cubriciones vegetales. Con el fin de obtener un valor porcentual, la fórmula se desarrolla como sigue:

$$\text{Índice Eficiencia Hidro-Energética} = 1 - \frac{\text{Consumo energía de riego (kWh/m}^2\text{a)}}{\text{Ahorro energía cubierta verde (kWh/m}^2\text{a)}} \times 100$$

8.3 CLASIFICACIÓN HIDRO-ENERGÉTICA DE LAS CUBIERTAS ECOLÓGICAS

Aplicando la fórmula propuesta, se consigue obtener una nueva clasificación de las cubriciones ecológicas para zonas cálidas y secas como el Mediterráneo, donde la escasez de agua resulta un factor determinante en su elección, en función de su eficiencia Hidro-Energética.

Índice de Eficiencia Hidro-Energética (%)	Clase de cubierta ecológica
90-100	Cubierta ecológica "Premium"
70-90	Cubierta ecológica "Plus"
50-70	Cubierta ecológica "Classic"
< 50	Solución no recomendada

Tabla 8.05. Clasificación de las cubiertas ecológicas en zonas cálidas y semi-áridas en función de su Eficiencia Hidro-Energética. Fuente: elaboración propia.

Como se ha desarrollado previamente, el porcentaje de Eficiencia Hidro-Energética refleja la capacidad de ahorro energético global que la aplicación de una azotea vegetal genera en un edificio en concreto.

Aunque la nomenclatura y segmentos de clasificación utilizados son orientativos, entendemos que reflejan acertadamente la intención de este nuevo método de jerarquización, incentivando el empleo de soluciones de cubierta lo más ecológicas posibles, al menos en términos de energía y agua.

Con esta nueva clasificación se superan o al menos se complementan los sistemas de nomenclatura tradicionales, divididos por intensidad de mantenimiento o estrictamente por espesor de sustrato, y se introduce en el proceso de elección de cubriciones vegetales un parámetro cuantitativo que permite evaluar la verdadera eficiencia energética de estas soluciones, evitando su utilización indiscriminada por considerarse a priori como beneficiosas.

Con el fin de generalizar su utilización, este Índice de Eficiencia Hidro-Energética sería fácilmente incorporable a los distintos software informáticos de cálculo energético, tales como DesignBuilder, lo que generaría una visión global de la ecología real, al menos energética, de las soluciones modelizadas.

Para el caso del edificio modelo y las cubiertas vegetales propuestas en este estudio, teniendo en cuenta los distintos escenarios de riego que se han extrapolado de las fases experimentales con probetas durante 2017 y 2018, los Índices de Eficiencia Hidro-Energética global que se obtendrían, serían los que se muestran en las tablas siguientes.

EDIFICIO TIPO B (sin aislamiento)				
Escenarios Necesidad Riego (l/m ² a)	Ahorro energético cubierta verde (kWh/m ² a)	Consumo energético riego (kWh/m ² a)	Índice de Eficiencia Hidro-Energética (%)	Clase de cubierta ecológica
Esc 1 (261,5)	10,88	0,62	94,30	"Premium"
Esc 2 (188,5)	10,88	0,44	95,95	"Premium"
Esc 3 (167,2)	10,88	0,39	96,41	"Premium"
Esc 4 (94,2)	10,88	0,22	97,97	"Premium"

Tabla 8.06. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio poco aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados. Fuente: elaboración propia según resultados de cálculo

EDIFICIO TIPO D (Passivhaus o equivalente)				
Escenarios Necesidad Riego (l/m ² a)	Ahorro energético cubierta verde (kWh/m ² a)	Consumo energético riego (kWh/m ² a)	Índice de Eficiencia Hidro-Energética (%)	Clase de cubierta ecológica
Esc 1 (261,5)	1,93	0,62	67,87	"Classic"
Esc 2 (188,5)	1,93	0,44	77,20	"Plus"
Esc 3 (167,2)	1,93	0,39	79,79	"Plus"
Esc 4 (94,2)	1,93	0,22	88,60	"Plus"

Tabla 8.07. Efectividad de la aplicación de una cubierta verde para un edificio muy aislado en cada uno de los escenarios de riego planteados. Fuente: elaboración propia según resultados de cálculo

De los datos recabados durante todo este estudio y de la nueva clasificación de cubiertas ecológicas en clima cálido, se podrían, por tanto, extraer las siguientes conclusiones.

Por un lado, para el edificio tipo modelizado con muy poco aislamiento, el índice de eficiencia hidro-energético obtenido de aplicar una cubierta verde es muy positivo, oscilando entre el 94 y el 97%.

Por consiguiente, se puede afirmar que los beneficios, en términos de energía, que las cubriciones vegetales aportan a los edificios con escaso aislamiento superan muy significativamente a los posibles consumos derivados del agua de riego.

Por otro lado, para el edificio modelo con altos niveles de aislamiento, similar a las construcciones Passivhaus, el índice de eficiencia hidro-energético que resulta de instalar una cubierta ecológica es sensiblemente menor, con valores que varían entre el 67 y el 88%, en función de cada escenario de intensidad de riego.

No obstante, de estos resultados también se puede concluir que para este caso, los ahorros energéticos en consumo de climatización que derivan de la incorporación de una azotea ajardinada ecológica en un edificio bajo el estándar Passivhaus, es decir, correctamente aislado, superan en más del doble a la energía consumida en captar, tratar y transportar el agua utilizada para su riego.

Por último, para cualquiera de los casos aquí tratados y para futuros trabajos, es fundamental recordar que, además del balance hidro-energético positivo que arrojan todos los ejemplos estudiados, tal y como se ha desarrollado a lo largo de esta tesis, existen numerosos beneficios que las cubiertas verdes aportan a los edificios y las ciudades, que a pesar de ser más difícilmente cuantificables, no son por ello menos relevantes para el bienestar de las personas y contribuyen a afrontar algunos de los retos presentes y futuros de nuestra sociedad.

Murcia, abril de 2020.

IX - REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

IX – REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Se enumera a continuación la bibliografía científica consultada únicamente durante el desarrollo de este trabajo de investigación.

Saiz Alcazar, S. Bass, B. (2005). *Energy performance of green roofs in a multi storey residential building in Madrid*. Comunicación presentada en 3rd Greening rooftops for sustainable communities Conference, 4-6 May 2005, Washington DC.

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, pp. 480-493.

Arato Gonçalves, A. McCoy, C. Macdonald, S. (2018). *Le Corbusier's Three Museums: A Workshop on Their Care and Conservation: 4–6 February 2018, Mill Owners' Building, Ahmedabad, India, and 8 February 2018, Government Museum and Art Gallery, Chandigarh, India*. Los Angeles: Getty Conservation Institute. Recuperado de https://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/three_museums.

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, pp. 845-859.

Bates, B. Kundzewicz, Z. Wu, S. Palutikof P. (2008). *Climate Change and Water*. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva. Recuperado de: <http://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-change-water-en.pdf>

Beck, H. Zimmermann, N. McVicar, T. Vergopolan, N. Berg, A. Wood, E. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Sci. Data*. 5:180214 doi: 10.1038/sdata.2018.214

Beecham, S. Razzaghmanesh, M. (2015). Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate. *Water Research*, 70, pp. 370-384.

Belda, M. Holtanová, E. Halenka, T. Kalvová, J. (2014). Climate classification revisited: from Köppen to Trewartha. *Climate Research*. Vol. 59: 1–13, 2014

Benvenuti, S. Bacci, D. (2010). Initial agronomic performance Mediterranean xerophytes in simulated dry green roofs. *Urban Ecosystems*, 13, pp. 349-363.

Bevilacqua, P. Coma, J. Pérez, G. Chocarro, C. Juárez, A. Solé, C. De Simone, M. Cabeza, L. (2015). Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. *Building and Environment*, 92, pp. 305-316.

Bianchini, F. Hewage, K. (2012). How green are green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48, pp. 57-65.

BOE (1941). Decreto de 22 de julio de 1941. Reglamento para aplicación del Decreto sobre las restricciones del hierro en la edificación de 11 marzo de 1941. Recuperado de www.boe.es

Boesiger, W. Girsberger, H. (1987). *Le Corbusier 1910-1965*. Editorial Gustavo Gili. Barcelona.

Bouma, E. (2005). Development of comparable agro-climatic zones for the international exchange of data on the efficacy and crop safety of plant protection products1. *EPPO Bulletin*. 35, pp. 233 - 238.

Brohé, A. Huberland, T. (2017). How Passive Houses Took Over Brussels. Recuperado de https://www.sallan.org/Snapshot/2017/05/how_passive_houses_took_over_brussels.php#.XpcstM3-uUk

Budyko, M. (1958). *Heat Balance of the Earth's Surface*. U.S. Department of Commerce, Weather Bureau. 259 páginas. Traducido por Nina A. Stepanova del original "Teplovoî balans zemnoî poverkhnosti". Leningrado 1956.

Butler, C. Butler, E, Orians, C. (2012). Native plant enthusiasm reaches new heights: Perceptions, evidence and the future of green roofs. *Urban Forestry & Urban Greening*, 11, pp. 1-10.

Capel Velázquez, A. (2004). *Manual de soluciones constructivas y puesta en obra de cubiertas ajardinadas*. Ed. UCAM, Murcia.

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, pp. 1582-1591.

Clements, A.M. (2010). "If we can't find a way, nature will" A brief history of roof greening in Greece and maybe the world. Comunicación presentada en World Green Roof Congress, CIRIA, 15-16 september, London.

Coma, J. Pérez, G. Castell, A. (2014). Green roofs as passive system for energy savings in buildings during the cooling period: use of rubber crumbs as drainage layer. *Energy Efficiency*, 7, pp. 841-849.

Compton, J. Whitlow, T. (2006). A Zero Discharge Green Roof System and Species Selection to Optimize Evapotranspiration and Water Retention. Comunicación presentada en 4th Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, 11-12 May, Boston, MA.

Conesa, C. (2006). El medio físico de la región de Murcia. Departamento de Geografía. Ed. Universidad de Murcia. Murcia.

Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio (2009) . Atlas de los paisajes de la Región de Murcia. Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia. Recuperado de <http://sitmurcia.carm.es/portal-del-paisaje>

Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge (2006). Banco de datos de Biodiversidad. <https://bdb.gva.es/bancomedatos/ficha.asp>

Cooley, H. Wilkinson, R. (2012). Implications of Future Water Supply Sources for Energy Demands. WaterReuse Research Foundation. Recuperado de <https://watereuse.org/watereuse-research/08-16-implications-of-future-water-supply-sources-for-energy-demands/>

Coutts, A. Daly, E. Beringer, J. Tapper, N. (2013). Assessing practical measures to reduce urban heat: Green and cool roofs. *Building and environment*, 70, pp. 266-276.

Dalley, Stephanie (2013). *The Mystery of the Hanging Garden of Babylon*. Londres: Oxford University Press. Recuperado de https://play.google.com/books/reader?id=6IUivLRnGC0C&hl=es&printsec=frontcover&source=gbs_atb_hover&pg=GBS.PP65

de Munck, C. Lemonsu, A. Bouzouidja, R. Masson, V. Claverie, R. (2013). The Greenroof module (v7.3) for medelling green roof hydrological and energetic performance within TEB. *Geoscientific Model Development*, 6, pp. 1941-1960.

Diodoro de Sicilia. Biblioteca histórica. Libros I-III. Introducción, traducción y notas de Francisco Parreu Alasà. Editorial Gredos, Madrid. 2001.³²

Dunnett, N. (2006). Green Roofs for Biodiversity: Reconciling Aesthetics with Ecology. Comunicación presentada en 4th Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, 11-12 May, Boston, MA.

Dunnett, N. Kingsbury, N. (2004). Planting options for extensive and semiextensive green roofs. Comunicación presentada en 2nd Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, 2-4 June, Portland, OR.

Dunnett, N. Nolan, A. (2004). The Effect of Substrate Depth and Supplementary Watering on the growth of nine herbaceous perennials in a semi-extensive green roof. *Acta Horticultural*. 643. Pp. 305-309.

Durhman, A. Rowe, B. (2007). Effect of Substrate Depth on initial growth coverage and survival of 25 succulent gr plant taxa. *HortScience*, 42 (3), pp. 588-595.

Durhman, A. VanWoert, N. Rowe, B. Rugh, C. Ebert-May, D. (2004). Evaluation of crassulaceae species on extensive green roofs. Comunicación presentada en 2nd Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference, 2-4 June, Portland, OR.

Dvorak, B. Volder, A. (2012). Rooftop temperature reduction from unirrigated modular green roofs in South-central Texas. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, pp. 28-35.

Elorrieta, J.I., (2009). La apropiación de los recursos: Huella ecológica y huella hídrica. Extracto de Asociación Sostenibilidad y Arquitectura.

Espinar, J. L. (2009). 1330 Pastizales salinos atlánticos (*Glauco-Puccinellietalia maritima*). En: AA.VV., Bases ecológicas preliminares para la conservación de los tipos de hábitat de interés comunitario en España. Madrid: Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.

Fang, C. (2008). Evaluating the thermal reduction effect of plant layers on rooftops. *Energy and Buildings*, 40, pp. 1048-1052.

³² Además de la obra aquí citada con la traducción española se ha consultado el texto original en griego con traducción al inglés en: Diodorus Siculus. *Library of History, Volume I: Books 1-2.34*. Translated by C. H. Oldfather. Loeb Classical Library 279. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1933. Recuperado de: <https://www.loebclassics.com/view/LCL279/1933/volume.xml>

- Farrell, C. Ang, X. Rayner, J. (2013). Water retention additives increase plant available water in green roof substrates. *Ecological Engineering*, 52, pp. 112-118.
- Farrell, C. Mitchell, R. E. Szota, C. Rayner, J. P. Williams, N. S. (2012). Green roofs for hot and dry climates: Interacting effects of plant water use, succulence and substrate. *Ecological engineering*, 49, pp. 270-276.
- Farreny, R. Morales-Pinzon, T. Guisasola, A. Taya, C. Rieradevall, J. Gabarrell, X. (2011). Roof selection for rainwater harvesting: Quantity and quality assessments in Spain. *Water research*, 45, (10), pp. 3245-3254.
- Feng C. Q. Meng Y. Zhang (2010). Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs. *Energy and Buildings*, 42, pp. 959-965.
- Ferrer Polo, J. Aguado García, D. Barat Baviera, R. Serralta Sevilla, J. Lapuente Ojeda, E. (2016). Huella Energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid. Fundación Canal.
- 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), pp. 1890-1904.
- FLL 2018. Guideline for the planning, execution and upkeep of green roof sites. Download edition, Bonn, January 2006.
- Gagliano, A. Detommaso, M. Nocera, F. Evola, G. (2014). A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. *Building and Environment*, 90, pp. 71-81.
- Garrido, A. (2007). Agua y Cambio Climático. Ente Público del Agua de la Región de Murcia. Recuperado de cambioclimaticomurcia.carm.es
- Getter, K. Rowe, B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41, pp. 1276-1285.
- Getter, K. Rowe, B. (2007). Effect of Substrate Depth and planting season on Sedum plug survival on green roofs. *Journal of Environmental Horticulture* 25(2). Pp: 95-99.
- Getter, K. Rowe, B. Andressen, J. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31, pp. 225-231.
- Givoni, B. (1976) *Man, Climate and Architecture*. Applied Science Publishers Ltd, London.

Gomez Campo, C. Gomez Tortosa, L. (1996). Especies vegetales en las azoteas verdes. *Revista agropecuaria y ganadera*, 773, pp. 1029-1033.

Granados, H. (2006). Principios y estrategias del diseño bioclimático en la arquitectura y el urbanismo. Eficiencia energética. Madrid. Ed: CSCAE.

Hardy, L. Garrido, A. Juana, L. (2012). Evaluation of Spain's Water-Energy Nexus. *International Journal of Water Resources Development*, v. 28 (n. 1). pp. 151-170.

Hoekstra, A.Y. (2007). Water Footprints: The Water Needs of People in Relation to Their Consumption Pattern. *Encyclopedia of Water Science*.

Hoekstra, A.Y. (2009). Human appropriation of natural capital: A comparison of ecological footprint and water footprint analysis. *Ecological Economics* 68(7): 1963-1974.

Howard, L. (1883). The climate of London. Vol I-III. Harvey Dorton. London.

IDAE (2010). Estudio de Prospectiva. Consumo energético en el sector del agua. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio. Recuperado de https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_Estudio_de_prospectiva_Consumo_Energetico_en_el_sector_del_agua_2010_020f8db6.pdf

IPCC, (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Recuperado de <https://www.oei.es/historico/cienciayuniversidad/?article140>

Kamarulzaman, N. Saleh, A. Hashim, S. Hashim, H. Abdul-Ghani, A. (2011). An Overview of the Influence of Physical Office Environments towards Employees. *Procedia Engineering*, 20, pp. 262-268.

Karachaliou, P. Santamouris, M. Pangalou, H (2016). Experimental an numerical analysis of the energy performance of a large scale intensive green roof system installed on an office building in Athens. *Energy and Buildings*, 114, pp. 256-264.

Klein G., Krebs M., Hall V., O'Brien T. Blevins B. (2005). California's Water-Energy Relationship. California Energy Commission. Recuperado de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiz3f2p6OroAhUS2BoKHYA9CdIQFjAAegQIAxAB&url=http%3A%2F%2Flarge.stanford.edu%2Fcourses%2F2012%2Fph240%2Fspearrin1>

%2Fdocs%2FCEC-700-2005-011-SF.PDF&usg=AOvVaw0XG9pb4A2KLn91fV-wo-jN

Klein, P. Coffman, R. (2015). Establishment and performance of an experimental Green Roof under extreme climatic conditions. *Science of the total Environment*, 512-123, pp. 82-93.

Köppen, W. Geiger, R. (1936). *Handbuch der Klimatologie. Das geographische System der Kilmate*. Berlin: Ed. Gebrüder Borntraeger.

Kotsiris, G. Androutopoulos, A. Polychroni, E. Nektarios, P. (2012). Dynamic U-value estimation and energy simulation for green roofs. *Energy and Buildings*, 45, pp. 240-249.

Kotsiris, G. Nektarios P. Ntoulas, N. Kargas, G. (2013). An adaptive approach to intensive green roofs in the Mediterranean climatic Region. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, pp. 380-392.

Kotsiris, G. Nektarios P. Paraskevopoulou, A. (2012). *Lavandula angustifolia* Growth and Physiology is affected by Substrate Type and Depth when grown under Mediterranean semi-intensive Green Roof conditions. *Hortscience*, 47, pp. 311-317.

Kotttek, M. Grieser, J. Beck, C. Rudolf, B. Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15 (3), pp. 259-263.

Kruger, E. Gonzalez Cruz, E. Givoni, B. (2010). Effectiveness of indirect evaporative cooling and thermal mass in a hot arid climate. *Building and Environment*, 45. (6), pp. 1422-1433.

Kumar, R. Kaushik, S.C. (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40, pp. 1505-1511.

La Roche, P. Berardi, U. (2014). Comfort and energy savings with active green roofs. *Energy and Buildings*, 82, pp. 492-504.

Le Corbusier, 1923. *Hacia una arquitectura (Vers une architecture)*. Barcelona. Ed. Apóstrofe (edición de 1998).

Lee, A. Sailor, D. Larson, T. Ogle, R. (2007). Developing a web-based tool for assesing green roofs. Comunicación presentada en 5th Annual Greening Rooftops for Sutainable Communities Conference. 29 Apr-1 May, Minneapolis, MN.

Leonard, T. Leonard, J. (2006). The green roof and energy performance-rooftop data analyzed. Comunicación presentada en 3rd North American Green Roof Conference: Greening rooftops for sustainable communities, 4-6 May 2005, Washington DC.

Li, W.C. Yeung, K. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3, pp. 127-134.

Magill, J. Midden, K. Groninger, J. Therrell, M. (2011). A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. OpenSIUC. Paper 91. Southern Illinois University Carbondale. http://opensiuc.lib.siu.edu/gs_rp/91

Majanlahti, A. Osti Guerrazzi, A. (2014). Roma divisa 1919-1925. Itinerari, storie, immagini. Milano. Ed. Il Saggiatore.

Martínez F.J. (2011). Estudio de la huella energética del abastecimiento urbano de agua de la provincia de Almería. Trabajo de Investigación del Máster Agua y Medio Ambiente en Áreas Semiáridas (AQUARID).

Metselaar, K. (2012) - Water retention and evapotranspiration of green roofs and possible natural vegetation types. *Resources, conservation and recycling*, 64, pp. 49-55.

Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2013). Catálogo español de especies exóticas invasoras. <https://www.miteco.gob.es>

Minke, G. (2005) - Techos Verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos. Artieda (Navarra). Ed: EcoHabitar.

Murgui M. Cabrera E. Pardo M. Cabrera E. Jr. (2009). Estimación del consumo de energía ligado al uso del agua en la ciudad de Valencia. Primeras Jornadas Ingeniería del Agua. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid. Recuperado de: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiK9Mn26OroAhUpyoUKHRGZDDgQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fita.upv.es%2Fidi%2Fdescargaarticulo.php%3Fid%3D224&usg=AOvVaw2MyOLaLUirDko208minVIt>

Naciones Unidas (2010). Resolución A/RES/64/292. Nueva York: United Nations. Recuperado de https://www.un.org/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml

Nardini, A. Andri, S. Crasso, M. (2012). Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants. *Urban Ecosystems*, 15, pp. 697-708.

Neila, F. J. (2000). *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible. Buenas prácticas edificatorias*. Cuadernos de Investigación urbanística, 41, pp. 89-99.

Neila, F. Bedoya, C. Acha, C. Olivieri, F. Barbero, M. (2008). Las cubiertas ecológicas de tercera generación: un nuevo material constructivo. *Informes de la Construcción*, 60 (511), pp. 15-24.

Nektarios P. Amountzias, I. Kokkinou, I. Ntoulas, N. (2011). Green Roof Substrate Type and Depth affect the growth of the native species *Dianthus fruticosus* under reduced Irrigation regimes. *HortScience*, 46 (8), pp. 1208-1216.

Nektarios P. Ntoulas, N. Nydrioti E. Kokkinou, I. Bali, E. Amountzias, I. (2015). Drought stress response of *Sedum sediforme* grown in extensive green roof systems with different substrate types and depths. *Scientia Horticulturae*, 181, pp. 52-61.

Niachou, A. Papakonstantinou, K. Santamouris, M. Tsangrassouls, A. Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. *Energy and Buildings*, 33, pp. 719 – 729.

NORMA UNI-11235 (2007). Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione, il controllo e la manutenzione di coperture a verde. Recuperado de <http://store.uni.com/catalogo/index.php>

Ntoulas, N. Nektarios P. Charalambous, E. Psaroulis, A. (2013). *Zoysia matrella* cover rate and drought tolerance in adaptive extensive green roof systems. *Urban Forestry & Urban Greening*, 12, pp. 522-531.

Olgyay, V. (1998). *Arquitectura y Clima. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas* (título original *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*, editado por Princeton University, Press en 1963) (2ª Edición ed.). Barcelona: Gustavo Gili.

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, pp. 1-14.

Osmundson, T. (1999). *Roof gardens : history, design, and construction* (1st ed). New York: Ed. W.W. Norton & Company.

Palomo Del Barrio, E. (1998). Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. *Energy and Buildings*, 27 (2), pp. 179-193.

Papafotiou, M. Pergialioti, N. Tassoula, L. (2013). Growth of Native Aromatic Xerophytes Extensive Mediterranean GR as affected by substrate type and depth and Irrigation frequency. *HortScience* 48 (10). pp: 1327-1333.

Peck, S. Kuhn, M. (2001). Design Guidelines for Green Roofs. Ontario Association of Architects and Ontario Mortgage and Housing Corporation. Recuperado de <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwis476-vOzoAhWix4UKHWWVDO0QFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fwww.eugene-or.gov%2FDocumentCenter%2FView%2F1049%2FDesign-Guidelines-for-Green-Roofs&usg=AOvVaw37FeF03po5GJ9XqB-tYAAAn>

Peel, M. C. Finlayson, B. L. McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 11, 1633–1644

Pisello, A. Piselli, C. Cotana, F. (2015). Thermal physics and energy performance of an innovative green roof system: The cool-green roof. *Solar Energy*, 116, pp. 337-356.

Provenzano, M. Cardarelli, M. Crasso, M. Colla, G. (2010). Evaluation of potential GR plant species in a Mediterranean climate. Comunicación presentada en World Green Roof Congress, CIRIA, 15-16 september, London.

Rahman, S. Ahmad, H. (2012). Green roofs as urban antidote: A review on aesthetic environmental, economic and social benefits. *South East Asia Technical University Conference Proceeding*, 6. pp. 93-97.

Raimondo, F. Trifiló, P. Lo Gullo, M. Andri, S. Savi, T. Nardini, A. (2015). Plant performance on Mediterranean green roofs: interaction of species-specific hydraulic strategies and substrate water relations. *Annals of Botany Plants* 7, pp. 1-12.

Ramankutty, N. Foley, J.A. (1999). Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992. *Global Biochemical cycles*, 13 (4), pp. 997-1027.

Razzaghmanesh, M. Beecham, S. 2014. The hydrological behaviour of extensive green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment*, 499, pp. 284-296.

Razzaghmanesh, M. Beecham, S. Brien, C. J. (2014). Developing resilient green roofs in a dry climate. *The Science of the total Environment*, 490, pp. 579-589.

Razzaghmanesh, M. Beecham, S. Kazemi, F. (2014). The Growth and Survival of plants in urban green roofs in a dry climate. *Science of the Total Environment*, 476-477, pp. 288-297.

Refahi, A. Talkhabi, H. (2015). Investigating the effective factors on the reduction of energy consumption in residential buildings with green roofs. *Renewable Energy*, 80, pp. 595-603.

Rowe, B, Getter, K. Durhman, A. (2012). Effect of GR media depth on crassulacean plant sucesion over seven years. *Landscape and urban planning*, 104, pp. 310-319.

Sailor, D.J. (2008). A Green Roof Model for Building Energy Simulation Programs. *Energy and Buildings*, 40, pp. 1466-1478.

Saiz Alcazar, S. Bass, B. (2006). Life cycle assesment of green roofs. Case study of an eight-story residential building in Madrid and implications for green roofs benefits. Comunicación presentada en Greening Rooftops for Sustainable Communities, 11-12 May, Boston, MA.

Sala L. (2007) Balances energéticos del ciclo del agua y experiencias de reutilización planificada en municipios de la Costa Brava. Seminario Internacional Agua, Energía y Cambio Climático. Valencia. Recuperado de https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwj25qzXvOzoAhVjzoUKHU_9D_8QFjAAegQIAxAB&url=http%3A%2F%2Fcbgi.org%2Fdocs%2Fvalencia_2007%2Fvalencia_2007_sala.pdf&usg=AOvVaw3I_FoPRUioMEC10p1epSgx

Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*. Murcia. Ed: Integral. Sociedad para el desarrollo rural.

Sánchez Gómez, P. Jiménez, J. Cánovas, J. Catalán, A. López, J. (2016). *Flora protegida y de interés del Parque natural de los Calares del Mundo y de la Sima*. Murcia. Ed. Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Desarrollo Rural de Castilla La Mancha.

Santamouris, M. Pavloua, C. Doukasa, P. Mihalakakoub, G. Synnefaa, A. Hatzibirosa, 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. *Energy*, 32, pp. 1781–1788.

Savi, T. Andri, S. Nardini, A. (2013). Impact of different green roof layering on plant water status and drought survival. *Ecological Engineering*, 57, pp. 188-196.

Savi, T. Marin, M. Boldrin, D. Incerti, G. Andri, S. Nardini, A. (2014). Green roofs for a drier world: effects of Hydrogel amendment on substrate and plant water status. *Science of the Total Environment*, 490, pp. 467-476.

Scholz-Barth, K. (2001) - Green Roofs - Stormwater Management From top to bottom. *Environmental design and construction*, January/February 2000, pp. 63-69.

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, pp. 25-32.

Serra, R. (1999). *Arquitectura y climas*. Barcelona. Editorial Gustavo Gili.

Sfakianaki, A. Pagalou, E. Pavlou, K. Santamouris, M. Assimakopoulos, M. (2009). Theoretical and experimental analysis of thermal behaviour of a green roof system installed in two residential buildings in Athens, Greece. *International Journal of Energy Research*, 33, pp. 1059-1069.

Shiklomanov, I. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. World fresh water resources. Peter H. Gleick (editor). New York. Oxford University Press.

Sun, T. Bou-Zeid, E. Ni, G. H. (2014). To irrigate or not to irrigate: Analysis of green roof performance via a vertically-resolved hygrothermal model. *Building and environment*, 73, pp. 127-137.

Sutton, R. (Ed.) (2015). *Green Roof Ecosystems*. Volumen 223. *Ecological Studies*. Londres. Ed. Springer International Publishing.

Tellez, F.M. Granados, H. Zarzalejo, L.F. Schwartz, G. Marco, J. (1996). Roof solutions for natural cooling. Typological Overview of feasible roof solutions for the Mediterranean region. Comunicación presentada en 4th European Conference on Architecture, 16-29 March, Berlín, Alemania.

Theodosiou, T (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 35, pp. 909-917.

Thuring, C. Dunnett, N. (2014). Vegetation composition of old extensive green roofs (from 1980s Germany). *Ecological Processes*, pp. 3-4.

Trewartha, G. Horn, L. (1980). *An introduction to climate*. (3ª Ed.). New York. Ed. McGraw-Hill.

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. New York: United Nations. Recuperado de <https://population.un.org/wup/>

United States Department of Agriculture (2020). Natural resources conservation service. <https://plants.sc.egov.usda.gov/core/profile?symbol=SEVE2>

Universidad de Murcia, (2020). Repositorio digital Flora de Murcia. <http://www.floraprotegida.es/>

Urbano-López, B. (2013). Naturación urbana, un desafío a la urbanización. RCHSCFA. doi: 10.5154/r.chscfa.2013.01.004.

US Dept of Energy (2015). *Getting Started with Energy Plus - Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running EnergyPlus*. Recuperado de https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/GettingStarted/GettingStarted/index.html

Van Mechelen, C. Dutoit, T, Hermy, M. (2014). Mediterranean open habitat vegetation offers great potential for extensive green roof design. *Landscape and Urban Planning*, 121, pp. 81-91.

VanWoert, N. Rowe, B. Andresen, J. Rugh, C. Fernandez, T. Xiao, L. (2005a). Green Roof Stormwater Retention: Effects of Roof Surface, Slope, and Media Depth. *Journal of Environmental Quality*, 34, pp. 1036–1044.

VanWoert, N. Rowe, B. Andresen, J. Rugh, C. Xiao, L. (2005b). Watering regime and GR Substrate design affect Sedum plant growth. *HortScience*, 40 (3), pp. 659-664.

Vera, F. García, J R. García, Z. (2008). *Atlas de irradiación solar y temperatura ambiente de la comunidad autónoma de Murcia*. ARGEM.

Vidal, P. Olivieri, F. Olivieri, L. Neila, J. (2010). Improving extensive green roofs and rainwater storage – quantitative analysis of the benefits. Comunicación presentada en World Green Roof Congress, CIRIA, 15-16 september, London.

Voyde, E. Fassman, E. Simcock, R. Wells, J. (2010). Quantifying Evapotranspiration Rates for New Zealand Green Roofs. *Journal of hydrologic engineering*, 15, (6), pp. 395-403.

Wadzuk, B.M. Schneider, D. Feller, M. Traver, R.G. (2013). Evapotranspiration from a Green-Roof Storm-Water Control Measure. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 139 (12), pp. 995-1003.

Webber, M.E. (2008). "Catch-22: Water vs. Energy," *Scientific American*, October 22. Recuperado de

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewj718Omv->

[zoAhUM1xoKHVtcCYMQFjAAegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.webberenergygroup.com%2Fwpnew%2Fwp-content%2Fuploads%2F14-Webber-SciAm-Earth-Oct-2008-Reprint.pdf&usg=AOvVaw0dbK4mW7fyqWk8-vyAj9uQ](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKewj718Omv-zoAhUM1xoKHVtcCYMQFjAAegQIAhAB&url=http%3A%2F%2Fwww.webberenergygroup.com%2Fwpnew%2Fwp-content%2Fuploads%2F14-Webber-SciAm-Earth-Oct-2008-Reprint.pdf&usg=AOvVaw0dbK4mW7fyqWk8-vyAj9uQ)

Wolf, D. Lundholm, J. T. (2008) Water uptake in green roof microcosms: Effects of plant species and water availability. *Ecological engineering*, 33 (2), pp. 179-186.

Wong, N.H. Tay, S.F. Wong, R.X. Ong, C.L. Sia, A. (2003). Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. *Building and Environment*, 38, pp. 499-509.

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO) (2014). Water and Energy. The United Nations World Water Report Development Report. Water and Energy. Paris, UNESCO. Recuperado de <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2014-water-energy/>

WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO). (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019: No dejar a nadie atrás. París, UNESCO. Recuperado de <https://es.unesco.org/water-security/wwap/wwdr>

Yannas, S. Erell, E. Molina, J. (2006). *Roof Cooling Techniques: A Design Handbook*. London. Ed Earthscan.

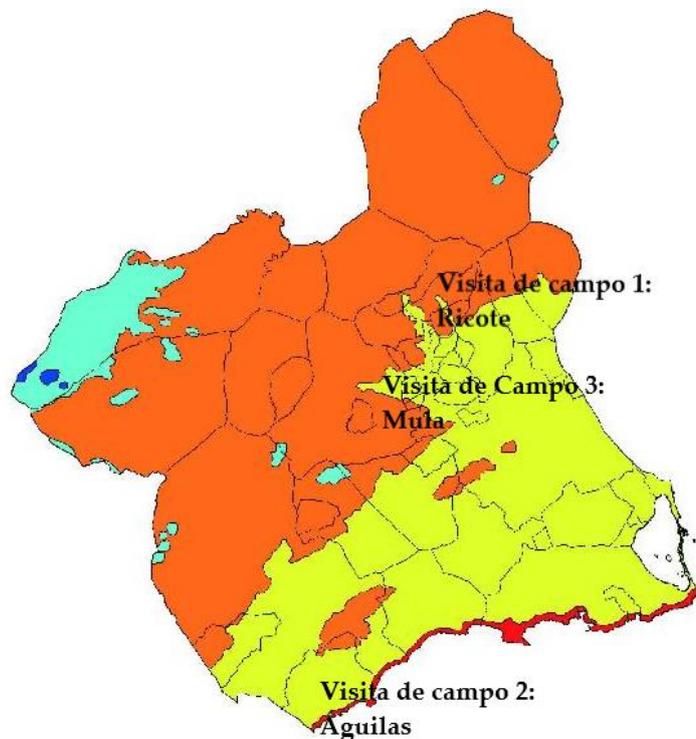
Zanni, E. (2008). *Patología de la Construcción y Restauo de Obras de Arquitectura*. 1ªed. Córdoba, Argentina. Ed. Brujas.

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, pp. 66-76.

X - ANEXOS

ANEXO 1: Visitas de campo

Con el objetivo de realizar una primera selección de especies vegetales autóctonas, se realizan varias visitas de campo en zonas cercanas a los municipios de Águilas, Ricote y Mula. Se trata de tres zonas vegetales y climáticas diferentes dentro de la Región de Murcia y en las fotografías que se acompañan se puede observar la diversidad vegetal de cada una de ellas. A partir de estas visitas, se estableció, con la inestimable colaboración del Dr. Pedro Sánchez Gómez, una primera selección de candidatas a formar parte de la fase experimental con cubiertas vegetales.



Mapa de las visitas de campo realizadas en la Región de Murcia durante los meses de marzo y abril de 2017.

Visita de campo 1

Fecha: 26 de Marzo de 2017

Localización: Sierra de Ricote.

Bioclimatología: Termotipo mesomediterráneo cálido / Ombrotipo seco.

Paisaje: Como se puede observar en las fotografías siguientes, la vegetación típica es la de sierras y pasillos subbéticos: “Los pinares, naturales y resultado de repoblaciones casi centenarias, cubren la mayor parte de las sierras, siendo especialmente densos en las umbrías. Le acompaña un sotobosque de gran diversidad, detectándose asimismo una potente regeneración de enebros, coscojas y encinas. En las solanas se reduce el porte y la densidad de pies y se hace dominante el matorral xerófilo dominado por romeros, tomillos, aulagas y en los sectores más bajos por el esparto y el albardín.”³³



Vista de la Sierra de la Navela desde Ricote. Fuente: autor.

³³ Obtenido de: Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio (2009). *Atlas de los paisajes de la Región de Murcia*. Recuperado de <http://sitmurcia.carm.es/portal-del-paisaje>





Especies identificadas como potenciales durante esta visita:

- *Stipa tenacissima* o Esparto
- *Lygeum Spartum* o Albardín
- *Thymus zygis sub. Sylvestris* o Tomillo salsero
- *Sedum sediforme* o Uña de gato
- *Helichrysum stoechas* o Siempreviva
- *Rosmarinus officinalis* o Romero común
- *Anthyllis cystoides* o Albaida
- *Asphodelus fistulosus* o Gamoncillo

Visita de campo 2

Fecha: 02 de Abril de 2017

Localización: Águilas/Lorca.

Bioclimatología: Termotipo termomediterráneo inferior / Ombrotipo semiárido.

Paisaje: El de las sierras litorales del Lomo de Bas – Rambla de las Moreras se trata de un paisaje que fue transformado por la acción del hombre: “La intensa deforestación para aprovechamiento del arsenal en Cartagena, o para la minería, dejó estas sierras con la vegetación arbustiva y de matorral mediterráneo. En general, aulagas, romeros, coscojas, enebros, tomillos, espartos y albardín, cubren con homogeneidad estas sierras, dotándolas de colores verdes y amarillos, sobre todo en primavera e inicio de verano.”³⁴



Vista del Cuartel del Ciscar. Fuente: autor.

³⁴ Obtenido de: Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio (2009). *Atlas de los paisajes de la Región de Murcia*. Recuperado de <http://sitmurcia.carm.es/portal-del-paisaje>







Especies identificadas como potenciales durante esta visita:

- *Stipa tenacissima* o Esparto
- *Lygeum Spartum* o Albardín
- *Thymus zygis sub. Sylvestris* o Tomillo salsero
- *Helichrysum stoechas* o Siempreviva
- *Rosmarinus officinalis* o Romero común
- *Anthyllis cystoides* o Albaida
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino
- *Ephedra fragilis* o Efedra
- *Asphodelus fistulosus* o Gamoncillo

Visita de campo 3

Fecha: 03 de Abril de 2017

Localización: Mula.

Bioclimatología: Termotipo termomediterráneo superior / Ombrotipo semiárido.

Paisaje: Este enclave en las cercanías del río Pliego, en Mula, se caracteriza por la presencia de “cárcavas, barrancos y ramblas que dibujan paisajes erosivos de gran singularidad” donde “son más abundantes y definitorias del paisaje los matorrales xerófilos, especialmente los atochares, los romerales y, sobre substratos yesíferos, tomillares gipsícolas.”³⁵



Vista del regadío tradicional que ocupa los fondos de las depresiones, mientras que el matorral xerófilo se distribuye por los bordes escarpados y planicies sin uso. Fuente: autor.

³⁵ Obtenido de: Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio (2009). *Atlas de los paisajes de la Región de Murcia*. Recuperado de <http://sitmurcia.carm.es/portal-del-paisaje>







Especies identificadas como potenciales durante esta visita:

- *Stipa tenacissima* o Esparto
- *Lygeum Spartum* o Albardín
- *Helichrysum stoechas* o Siempreviva
- *Rosmarinus officinalis* o Romero común
- *Anthyllis cystoides* o Albaida
- *Sedum sediforme* o Uña de gato
- *Artemisia barrelieri* Besser o Tomillo negro, boja

ANEXO 2: Especies vegetales seleccionadas.

Tras realizar las investigaciones de campo y la revisión bibliográfica de especies autóctonas de la Región de Murcia que a priori podían constituir buenas candidatas para su implantación en cubiertas vegetales, las especies finalmente seleccionadas, para las dos fases experimentales correspondientes a los años 2017 y 2018, son las siguientes:

Año 2017:

- *Lygeum Spartum* o Albardín (viveros Muzalé)
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino (viveros Muzalé)
- *Thymus zygis* sub. *Sylvestris* o Tomillo fino (viveros Muzalé)
- *Helichrysum stoechas* o Siempreviva (viveros Muzalé)
- *Ephedra fragilis* o Efedra (viveros Muzalé)
- *Rosmarinus eriocalix* o Romero blanco (viveros Muzalé)

Año 2018:

- *Lygeum Spartum* o Albardín (viveros Muzalé)
- *Limonium Caesium* o Sopaenvino (viveros Muzalé)
- *Thymus zygis* sub. *Sylvestris* o Tomillo fino (recogida silvestre controlada en Prov. Albacete)
- *Salvia lavandulifolia* (recogida silvestre controlada en Prov. Albacete)
- *Asteriscus maritimus* (viveros Muzalé)
- *Brachypodium retusum* (viveros Muzalé)

La mayor parte de los ejemplares fueron adquiridos en Viveros Muzalé, empresa especializada en planta autóctona que se encuentra en la Rambla de Muzalé, en Abanilla. Los ejemplares de salvias y tomillos de la segunda fase experimental fueron recolectados de forma controlada en la Provincia de Albacete con la inestimable ayuda del Dr. Pedro Sánchez Gómez y su equipo.

LYGEUM SPARTUM O ALBARDÍN ³⁶

Nombre científico: *Lygeum spartum* (L.) Kunth.

Nombre común: Albardín.

Ámbito biogeográfico: gran parte del Mediterráneo.

Hierba perenne de la familia de las gramíneas, forma una mata densa de hasta medio metro de porte. Presenta flores entre abril y junio con forma de espiguilla envueltas en una vaina que asemeja al papel. Se puede encontrar en suelos salinos y de margas y arcillas, pero con buen drenaje.



³⁶ Información extraída de: *Guía básica de Fauna y Flora del Parque Regional de las Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar*. (2017). Ed. Consejería de Desarrollo sostenible y Ordenación del Territorio. Accesible en:

http://www.murcianatural.carm.es/web/guest/visor-contenidos-dinamicos?p_p_id=20&p_p_lifecycle=1&p_p_state=exclusive&p_p_mode=view&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fget_file&_20_folderId=781717&_20_name=DLFE-50209.pdf

LIMONIUM CAESIUM O SOPAENVINO³⁷

Nombre científico: *Limonium caesium* (Girard) Kuntze.

Nombre común: Siemprevivas, sopaenvinos.

Ámbito biogeográfico: Murciano-almeriense.

Con varias subespecies muy similares morfológicamente presentes en la Región de Murcia, de las cuales la mayor parte se pueden emplear en jardinería y ornamentación, se encuentra habitualmente en matorrales y albardinales, en especial sobre sustratos salinos y de margas. Híbrida, entre otras con *L. insigne*, subespecie más extendida por la costa, lo que dificulta su identificación.



³⁷ Información extraída de Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*. Murcia. Ed: Integral. Sociedad para el desarrollo rural, junto con el repositorio de Flora Protegida de la Región de Murcia impulsado por el Grupo de Investigación E005-07 de biología, ecología y evolución de briófitos y espermatófitos de la Universidad de Murcia, accesible en: <http://www.floraprotegida.es>

THYMUS ZYGIS SUB. SYLVESTRIS O TOMILLO FINO³⁸

Nombre científico: *Thymus zygis* sub. *Sylvestris* (Hoffmanns. & Link) Brot.

Nombre común: Tomillo rojo rastrero, tomillo fino, tomillo blanco.

Ámbito biogeográfico: Península Ibérica y norte de Marruecos.

Subespecie de tomillo de pequeño porte, generalmente decumbente, se encuentra habitualmente en matorrales y espartizales y es capaz de cubrir suelos arenosos y bien drenados. Es una variedad menos abundante en la Región de Murcia, declarada de interés especial en el Altiplano, por su alto valor comercial como especie aromático-medicinal.



³⁸ Información extraída de Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*. Murcia. Ed: Integral. Sociedad para el desarrollo rural.

HELICHRYSUM STOECHAS O SIEMPREVIVA ³⁹

Nombre científico: *Helichrysum stoechas* (L.) Moench

Nombre común: Siempreviva amarilla, manzanilla bastarda, perpetua, amaranto.

Ámbito biogeográfico: De distribución circunmediterránea.

Planta perenne, con tallos verdosos-plateados y floración de color amarillo muy intenso desde la primavera, incluso febrero en la Región de Murcia, hasta bien entrado agosto. Su hábitat natural son ambientes secos y soleados, arenas litorales, matorrales despejados y frecuentemente cunetas. Tiene un gran interés como repobladora de dunas costeras y taludes.



³⁹ Información extraída de: *Guía básica de Fauna y Flora del Parque Regional de las Salinas y Arenales de San Pedro del Pinatar*. (2017). Ed. Consejería de Desarrollo sostenible y Ordenación del Territorio. Accesible en:

http://www.murcianatural.carm.es/web/guest/visor-contenidos-dinamicos?p_p_id=20&p_p_lifecycle=1&p_p_state=exclusive&p_p_mode=view&_20_struts_action=%2Fdocument_library%2Fget_file&_20_folderId=781717&_20_name=DLFE-50209.pdf

EPHEDRA FRAGILIS O EFEDRA⁴⁰

Nombre científico: *Ephedra fragilis* Desf. subs. *fragilis*.

Nombre común: Efedra, belcho, arnacho.

Ámbito biogeográfico: Norte de África y sureste de Europa.

Planta muy ramificada de color verde oscuro, puede alcanzar hasta los 2 m. de altura, aunque habitualmente no sobrepasa 1 m. Se puede encontrar en taludes y espolones con sustratos muy áridos, a veces nitrificados, en rocas margas y yesos en ambientes cálidos. Es una especie muy bien adaptada a condiciones extremas por lo que es remomendada para revegetación de sustratos pobres y xerojardinería.



⁴⁰ Descripción extraída de: <https://www.viverosmuzale.com/ephedra-fragilis/> junto con Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*. Murcia. Ed: Integral. Sociedad para el desarrollo rural.

ROSMARINUS ERIOCALIX O ROMERO BLANCO ⁴¹

Nombre científico: *Rosmarinus eriocalix* Jord. & Fourr.

Nombre común: Romero, romero blanco, romero moro.

Ámbito biogeográfico: Norte de África y provincia de Almería.

Arbusto perteneciente a la familia de las Lamiaceae (Labiatae), con tallos erectos y procumbentes, tendentes a enraizar, que se puede encontrar en matorrales xerófilos y en espartales sobre sustratos arcillosos, calcáreos o yesíferos, especialmente en ramblas. Está incluida en la Lista roja de la flora vascular española calificada como "En peligro" y se escoge para este estudio, en lugar del más común *R. officinalis*, por su mayor resistencia a la sequía.



⁴¹ Descripción extraída de: <http://www.almerinatura.com/joyas/rosmarinus-ericalyx.html> junto con Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*. Murcia. Ed: Integral. Sociedad para el desarrollo rural.

ASTERISCUS MARÍTIMUS O MARGARITA DE MAR⁴²

Nombre científico: *Asteriscus maritimus* (L.) Less.

Nombre común: margarita de mar o estrella de mar.

Ámbito biogeográfico: Mediterráneo occidental y Grecia.

Planta tapizante que se encuentra de forma natural en acantilados marítimos y zonas próximas a la costa, incluso en rocas. Su intensa floración, que va desde abril a mayo, de color amarillo, conforma grandes manchas, lo que junto con su bajo mantenimiento y tolerancia a la sequía y salinidad ha incrementado su uso en jardinería o como restauradora y fijadora de taludes.



⁴² Descripción extraída de <https://www.viverosmuzale.com/asteriscus-maritimus/>

SALVIA LAVANDULIFOLIA O MARISIERVA⁴³

Nombre científico: *Salvia lavandulifolia* (Vahl.).

Nombre común: Marisierva, salvia española.

Ámbito biogeográfico: España y sur de Francia.

Planta radicante con grandes propiedades como fijadora de suelo, por lo que se emplea ampliamente en taludes y terraplenes de obras públicas. En la Región de Murcia, donde está catalogada como especie objeto de gestión, se presentan varias subespecies según la zona, pero todas ellas tienen en común sus altas propiedades aromático-medicinales.



⁴³ Descripción extraída del repositorio de Flora Protegida de la Región de Murcia impulsado por el Grupo de Investigación E005-07 de biología, ecología y evolución de briófitos y espermatófitos de la Universidad de Murcia, accesible en: <http://www.floraprotegida.es/objeto-gestion.php/Salvia-lavandulifolia-s.l.-63/> y de Sánchez Gómez, P. Guerra, J. Jiménez, J. Cánovas, J. Torrente, P. (2015). *Las plantas aromático-medicinales y otras especies de interés económico del Noroeste de la Región de Murcia*. Murcia. Ed: Integral. Sociedad para el desarrollo rural.

BRACHYPODIUM RETUSUM O FENAL⁴⁴

Nombre científico: *Salvia lavandulifolia* (Vahl.).

Nombre común: Fenal, pasto, lastón.

Ámbito biogeográfico: Norte de África, Turquía y sur de Europa.

Herbácea perenne y radicante, de rizoma ramificado, se encuentra formando matorrales y pastizales en sustratos de margas y en fisuras rocosas. Su floración, en forma de espigas, ocurre entre mayo y junio. Se emplea como estabilizadora y fijadora de suelo en taludes secos y pedregosos. En la Región de Murcia se encuentra muy extendida, desde el litoral hasta el interior.



⁴⁴ Descripción extraída de: <https://www.viverosmuzale.com/brachypodium-retusum/> y de Sánchez Gómez, P. Jiménez, J. Cánovas, J. Catalán, A. López, J. (2016). *Flora protegida y de interés del Parque natural de los Calares del Mundo y de la Sima*. Ed. Consejería de Agricultura, Medio Ambiente y Desarrollo Rural de Castilla La Mancha.

ANEXO 3: Sistemas Comerciales estudiados.

EMPRESA: DIADEM.

Fuente: <https://greenuptheroof.com/>

- Sistema cubierta ajardinada semi-intensiva Diadem 350:

CUBIERTA AJARDINADA SEMI INTENSIVA **DIADEM® 350**



■ Descripción Producto
 DIADEM®350 es una cubierta ajardinada de tipo semi-intensivo, por lo general cubierta con césped, plantas perennes y arbustos, que ofrece diferentes acabados y usos.

■ Espesor del sistema: **aprox. 300 mm**
■ Peso en estado saturado: **aprox. 350 kg/m² (sin vegetación)**
■ Ver: 15 16 17 21

■ Función
 Además de los beneficios ecológicos habituales, este tipo de construcción tiene el valor añadido de ofrecer un valioso espacio adicional para el uso recreativo.

■ Aplicación
 Este tipo de instalación se recomienda cuando existe el deseo de crear un ambiente agradable que puede ser utilizado por las personas que trabajan o que viven en el lugar.

■ Ventajas

- Apto para el uso diario
- El valor de la propiedad se incrementa
- Hay un mayor aprovechamiento del espacio disponible
- Una amplia gama de diseños son posibles
- El coste de inversión es relativamente bajo
- Técnicamente funcional
- Se mejora la eficiencia térmica
- Se mejoran los beneficios ambientales
- Buena retención de agua pluvial
- La instalación es más económica que la de un jardín de cubierta totalmente diseñado.
- Sistema también apropiado para construcción de cubierta invertida ya que dispone de la ventaja de una lámina adicional de protección.

■ Preguntas Frecuentes ?

- **¿Por qué semi-intensivo?**
 Es posible que la estructura de la cubierta no pueda soportar el peso de un diseño de cubierta ajardinada más completa.
- **¿Qué ocurre con el mantenimiento?**
 Esto debe considerarse en las primeras etapas de planificación y debe incluir aspectos tales como la provisión de un acceso adecuado, el riego y un programa de mantenimiento.
- **¿Qué ocurre con el mantenimiento del césped?**
 El césped debe cortarse a menudo y regularmente con el fin de garantizar que permanezca corto y por lo tanto no se necesite recoger la siega. De hecho, estos recortes aportan nutrientes beneficiosos para el césped.

■ Construcción Típica de cubierta ajardinada plana invertida

- Plantas tapizantes con variedades de césped, plantas perennes y arbustos.
- SRM-30 es una mezcla de tierra rica en nutrientes que consta de lava, piedra pómez, con una base de productos de arcilla recicladas y trituradas y enriquecido con compost. SRM es ideal para el césped.
- VLF-200 es un geotextil de filtro, de colocación superior, por encima de la lámina drenante, con una excelente resistencia y soporte a la presión de materiales. Fabricado de polipropileno, con capacidad a la permeabilidad de agua y difusión de vapor.
- DiaDrain-40 es una ligera lámina de drenaje y retención de agua. Tiene buena capacidad de soporte de carga y proporciona un drenaje, retención y aireación excelentes.
- Los paneles de aislamiento térmico de poliestireno extruido son apropiados para la construcción de cubiertas invertidas.
- Opcional entre varios tipos: para este tipo de construcción, la recomendación es el geotextil de protección y separación VLU-300. Nota: Esta lámina de separación deberá ser tenida en cuenta también siempre donde existan problemas de compatibilidad entre diferentes materiales.
- Membrana impermeabilizante y antivaz. Nota: Las membranas impermeabilizantes no antivaz requieren se instale una lámina antivaz independiente. Ej.: FLW-400.
- Capa formación de pendientes
- Forjado de losa hormigón armado.

14


www.diadem.com

- Sistema cubierta ajardinada extensiva Diadem 150:

CUBIERTA AJARDINADA EXTENSIVA DIADEM® 150



■ Descripción Producto
DIADEM® 150 es un sistema de Cubierta Ajardinada multicapa, que consta de en una capa de protección, lámina de drenaje, filtro y sustrato de plantas rico en minerales adecuado para plantas resistentes a la sequía.

■ Espesor del sistema: 70-120 mm
■ Peso en estado saturado: 90-150 kg/m² (sin vegetación)
■ Páginas relacionadas: [10](#) [11](#) [12](#) [13](#) [14](#)

■ Función
Para proporcionar una capa de protección ecológica en la cubierta con todas las ventajas que se enumeran a continuación.

■ Aplicación
Se recomienda la aplicación de este sistema en estructuras con una capacidad de carga limitada y en las zonas con nula o mínima regularidad de su uso.

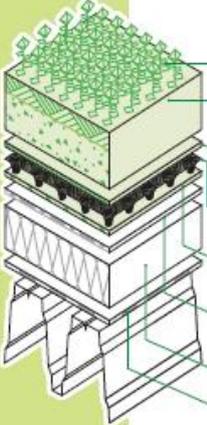
■ Ventajas

- Mejora de la capacidad de aislamiento térmico.
- Capacidad de retención de agua pluvial, ayudando a reducir el riesgo de inundaciones repentinas.
- Espacio habitable abierto a la naturaleza.
- Sistema adecuado para la mayoría de estructuras de cubierta ligeras.

■ Preguntas Más Frecuentes

- **¿Es necesario el riego de la vegetación?**
No siempre, dependerá básicamente de las condiciones climáticas donde se instale la cubierta. La vegetación recomendada para el sistema DIADEM® 150 abarca especies herbáceas resistentes a la sequía, plantas perennes que crecen en su hábitat natural en condiciones muy duras.
- **¿Qué mantenimiento requiere la vegetación?**
Una vez colocadas, estas plantas son muy resistentes, y por consiguiente, sólo requieren un mantenimiento mínimo, limitado a desbroces ocasionales.
- **¿Cuánto tiempo se necesita para que la vegetación se establezca?**
Esto depende del método de siembra y las condiciones en el momento de la siembra.
- **¿Qué tipo de plantación es posible?**
La mezcla sedum / flores silvestres se selecciona en función de las condiciones locales.

■ Construcción Típica de Cubierta



- Plantas perennes resistentes a la sequía.
- Capa de sustrato SEM, posee un bajo contenido de materia orgánica, fabricado mayoritariamente con componentes minerales y con buena permeabilidad al agua.
- El geotextil de filtro VLF-150, colocado en la parte superior, con propiedades excelentes en resistencia y soporte de la presión. Fabricado en polipropileno, permeable al agua y a la difusión del vapor.
- Lámina de drenaje/reservorio DiaDrain-25 H. Con buena capacidad de carga y excelentes propiedades de drenaje, retención de agua y aireación.
- Lámina protección mecánica VLU 300. Formulada con polipropileno. Posee una cara inferior más suave ofreciendo una protección ideal a la membrana de impermeabilización.
- Lámina impermeabilizante antiariz. NOTA: Una membrana impermeabilizante no antiariz, requiere una lámina independiente especial contra las raíces. Ejem.-FLW-400
- Capa aislamiento térmico compatible.
- Lámina Barrera de Vapor.

8

[www.diadem.com](#)

- Filtro de Protección y retención de agua VLS-500.
Comercializado a través de Projar: www.projar.es

Filtro de Protección y Retención VLS-500

Fileto para la protección mecánica y separación de la membrana impermeabilizante, filtro de sólidos y retención de agua. Se dispone por encima de dicha membrana impermeabilizante asegurando un funcionamiento seguro de la cubierta ajardinada.

Ventajas

Resistente a sustancias ácidas y básicas
Soporta altos pesos debido a su elasticidad
Excelente permeabilidad al agua
Fácil de cortar

Para su instalación, eliminar los residuos de la superficie comprobando que esté limpia. Extender el geotextil y dejar 100 mm de solapamiento entre terminaciones.



ESPECIFICACION PARA PROYECTO

Fileto técnico de protección y retención de agua VLS-500 de Diadem. Capa de protección mecánica y retención de agua, resistente a la podredumbre, no tratada térmicamente por ninguna cara, fabricada 100% fibras sintéticas. Permeabilidad agua: 50 mm/s; Peso superficie: 500 g/m²; resistencia a la tracción MD: 4,4 kN/m; resistencia a la tracción CMD: 6,0 kN/m; Test punzonamiento estático (CBR): 3,3 kN; Tamaño de abertura característica: 0,86 mm; clase robustez GRK 4; embalaje: 100 m²/roll; peso embalaje: 50 kg/roll. Colocación: con un solape de 10 cm.

INFORMACIÓN TÉCNICA

Peso superficie (g/m ²)	500
Espesor (mm)	4,0
Resistencia a la tracción MD (kN/m)	4,4
Resistencia a la tracción CMD (kN/m)	6,0
Test de punzonamiento estático (CBR) (kN)	3,3
Tamaño de abertura característica O90 (mm)	0,86
Capacidad retención de agua (l/m ²)	3,6
Permeabilidad al agua (mm/s)	50
Clase de Robustez (GRK)	4
Material	70% PES+30% PP
Método de producción	No tratado térmicamente

*Revisado 19.06.2015

*Especificaciones sujetas a cambiar sin aviso

- Lámina de drenaje y reservorio de agua DiaDrain-40.

Comercializado a través de Projar: www.projar.es

Lámina de Drenaje y Reservorio de Agua DiaDrain®-40H

Lámina de drenaje y retención de agua para cubiertas ajardinadas semi intensivas o intensivas. También apta para superficies con paso de peatones en cubiertas planas y cero grados de pendiente.

DiaDrain-40H está formado por concavidades donde se almacenan el agua de la lluvia y del riego. El agua sobrante se conducirá hacia los canales de evacuación.

Esta lámina posee en la parte superior unas pequeñas perforaciones que aseguran una adecuada aireación del sustrato.

Dependiendo del tipo de cubierta, la colocación de dicha lámina requerirá un solape de 1 ó 2 filas de concavidades. En cubiertas planas, este solape será casi insignificante.

Fabricada de poliestireno de alto impacto reciclado (HIPS).



(1)Vegetation, (2)Growing media, (3)VLF 150/200 filter layer, (4)DiaDrain-40H, (5)VLU 300/VLS 500 mechanical protection layer, (6)Root resistant waterproofing membrano, (7)Root construction



EN12252



100% recyclable

Microbiological resistance
EN12225
25-year stability guaranteed

VENTAJAS

Alta capacidad de retención de agua: aproximadamente 19,59 l/m²

Previene la saturación del sistema de drenaje de agua en los canales: ralentiza la velocidad del agua mediante las barreras escalonadas

Certificado de resistencia microbiológica de las láminas de poliestireno (EN 12225): protección adicional para la capa impermeabilizante contra el daño microbiológico.

Respiraderos insertados para la evaporación: no se obstruye la aireación

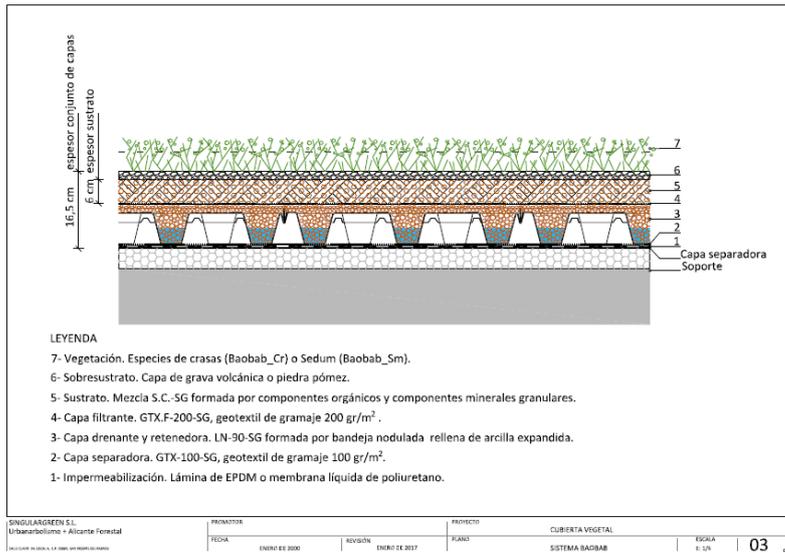
Material de alta duración y resistencia de alto impacto (HIPS): estabilidad bajo pavimentos, la refrigeración por agua no es necesaria durante instalaciones en verano

EMPRESA: ALICANTE FORESTAL Cubiertas vegetales.

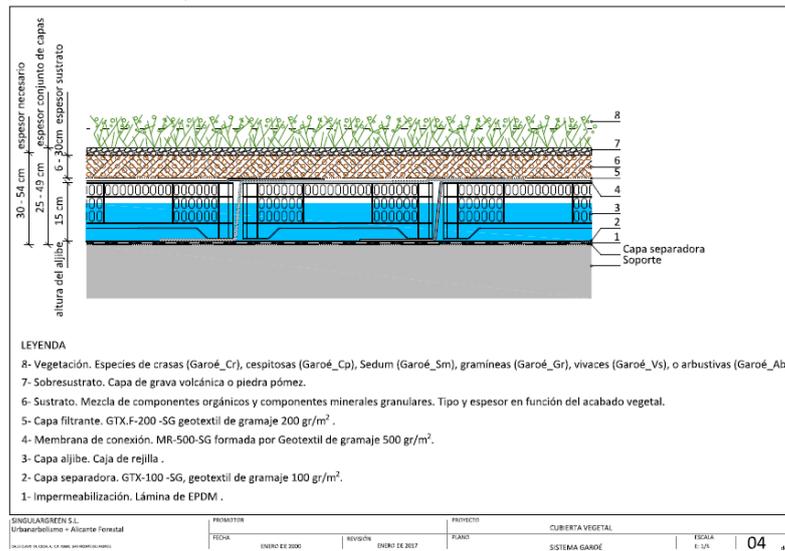
Fuente: <http://www.alicanteforestal.es/cubiertas-vegetales/> acceso el 29/05/2017

En concreto los sistemas:

- Cubiertas vegetales Baobab



- Cubiertas vegetales Garoé:



EMPRESA: DANOSA.

Fuente: <https://portal.danosa.com/danosa/CMSServlet?node=cubiertas&lng=1&site=1> acceso el 27/05/2017

En concreto los sistemas:

- Cubierta plana ajardinada extensiva (ecológica)
- Cubierta plana ajardinada intensiva (jardín) (bicapa)

EMPRESA: ELMICH.

Fuente: <https://www.elmich.com/> acceso el 28/05/2017

En concreto los sistemas:

- VersiDrain 60P
- MEP Tray

EMPRESA: GREEN GRID USA.

Fuente: www.GreenGridRoofs.com acceso el 28/05/2017

En concreto los sistemas:

- RespondFast Real-Time Monitoring
- Recommended Plant List: Southern California Extensive Plants

EMPRESA: HARPO SPA ITALIA.

Fuente: <http://www.harpogroup.it/verdependibile/home> acceso el 29/05/2017

En concreto los sistemas:

- Sistema estensivo ad aromatiche
- Sistema estensivo composito 1
- Sistema estensivo composito 2

EMPRESA: IGNIAGREEN.

Fuente: <https://igniagreen.com/sistema-horizontal/> acceso el 29/05/2017

En concreto los sistemas:

- Igniaclack
- Igniagreen sets

EMPRESA: INTEMPER.

Fuente: http://intemper.com_documentos_intemper acceso el 12/08/2010

En concreto los sistemas:

- SISTEMA intemper TF ECOLÓGICO
- SISTEMA intemper TF ECOLÓGICO ALJIBE

EMPRESA: RENOLIT ALKORGREEN.

Fuente: <https://www.renolit.com/es/industrias/hogar-y-construccion/exterior/cubiertas/renolit-alkorgreen> acceso el 29/05/2017

En concreto los sistemas:

- alkorPLUS 81016
- alkorPLAN

EMPRESA: SEMPERGREEN.

Fuente: <https://www.sempergreen.com/es> acceso el 29/05/2017

En concreto los sistemas:

- Cubierta con biodiversidad de 0 a 15 grados

EMPRESA: TEXSA.

Fuente: <http://www.texsa.com/en/soluciones/id298/conventional-flat-green-roof-extensive-double-layer-app-waterproofing-zones-a-b-c-d-.htm> acceso el 27/05/2017

En concreto los sistemas:

- TEXSA drentex protect 500 garden
- TEXSA drentex impact garden plus
- Sistema Greentex de cubierta ajardinada extensiva

EMPRESA: KNAUF INSULATION .

Fuente: <https://www.knaufinsulation.es/lana-mineral/sistema-urbanscape-cubierta-verde> acceso el 28/05/2017

En concreto los sistemas:

- Urbanscape Drainage PDS
- Urbanscape Green Roll
- Urbanscape Sedum-mix PDS

EMPRESA: VEGETAL ID USA.

Fuente: <http://www.vegetalid.us/green-roof-solutions/green-roofs.html> acceso el 28/05/2017

En concreto los sistemas:

- Hydropack

EMPRESA: WALLBARN UK.

Fuente: <https://www.wallbarn.com/green-roofs/our-range/> acceso el 28/05/2017

En concreto los sistemas:

- Protecto-drain 60P
- M-Tray modular green roof

EMPRESA: ZINCO.

Fuente: <https://zinco-cubiertas-ecologicas.es/> acceso el 27/05/2017

En concreto los sistemas:

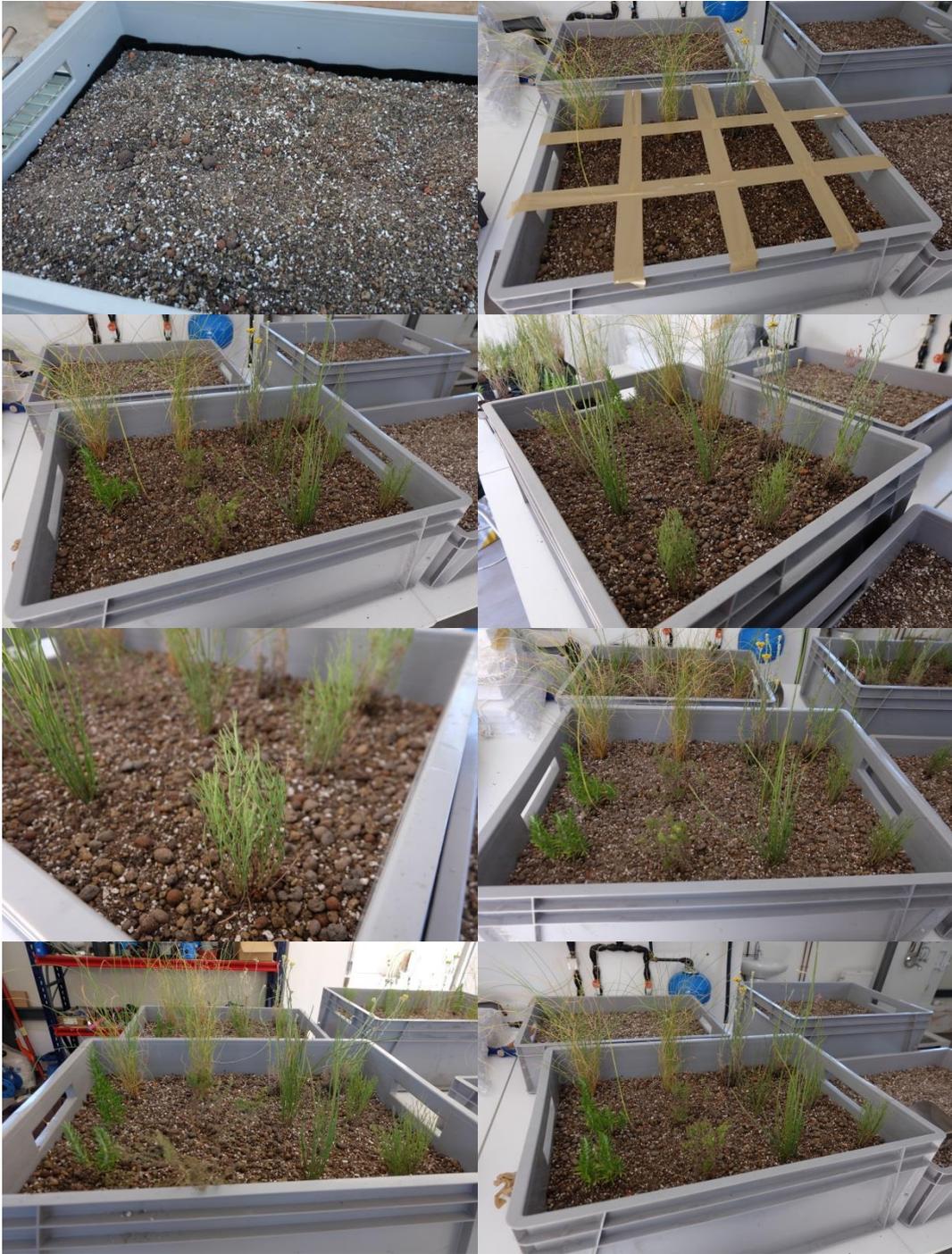
- ZinCo FT Floradrain FD 25-E
- ZinCo FT Zincoterra Aromaticas
- Manta protectora y retenedora ISM 50
- Manta protectora y retenedora SSM 45

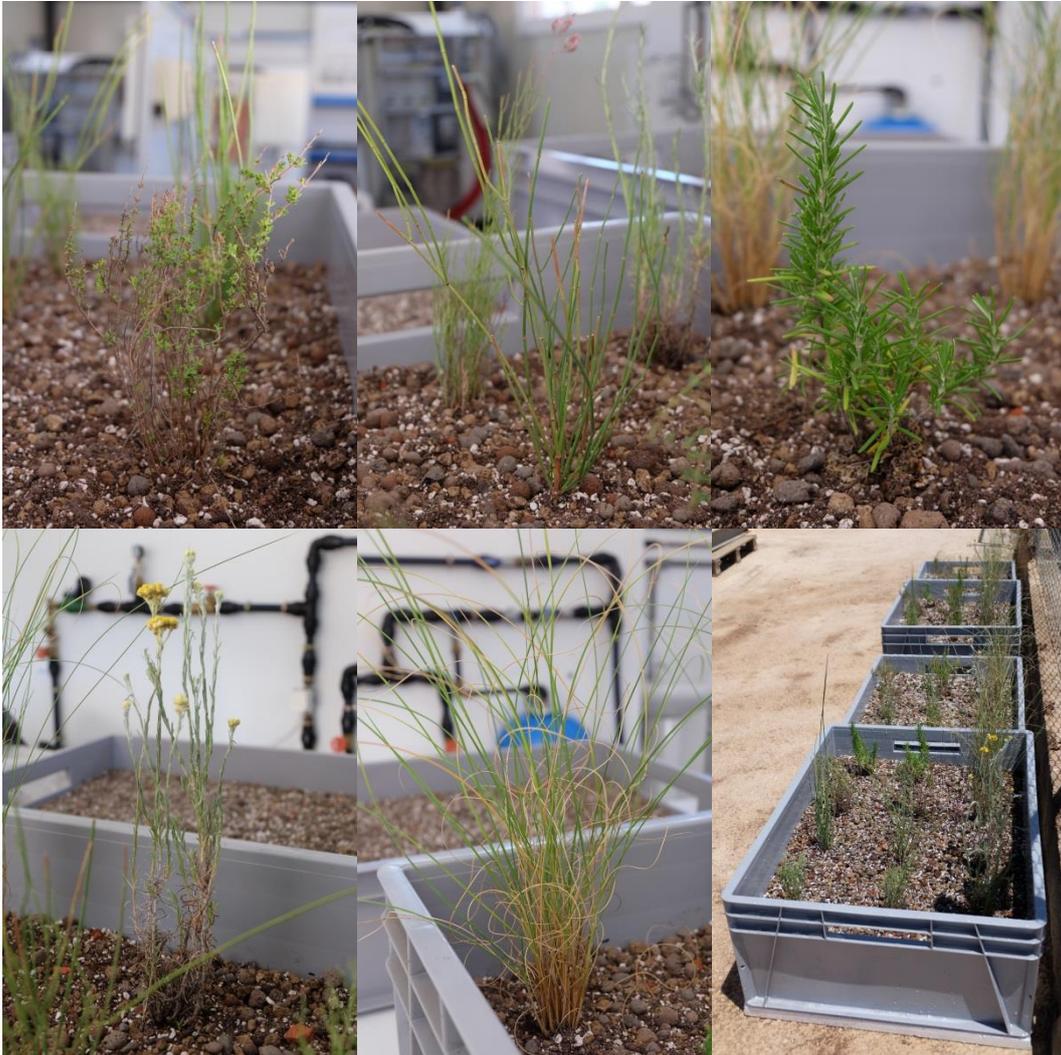
ANEXO 4: Proceso de instalación de los módulos experimentales.













Resultado final de la instalación de los módulos experimentales, una vez situados en el exterior del Laboratorio de Materiales de la UCAM.

ANEXO 5: Resultados de los cálculos energéticos en DesignBuilder.**DATOS EDIFICIO ESTÁNDAR (TIPO A)**

Program Version: **EnergyPlus, Version 8.6.0-198c6a3eff, YMD=2019.02.17 17:13**

Tabular Output Report in Format: **HTML**

Building: **Building**

Environment: **UNTITLED (01-01:31-12) ** Murcia - ESP SWEC WMO#=084300**

Simulation Timestamp: **2019-02-17 17:13:23**

Table of Contents

Report: **Annual Building Utility Performance Summary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2019-02-17 17:13:23**

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	22122.66	250.45	250.45
Net Site Energy	22122.66	250.45	250.45
Total Source Energy	69241.27	783.89	783.89
Net Source Energy	69241.27	783.89	783.89

Normalized Metrics**Utility Use Per Conditioned Floor Area**

	Electricity Intensity [kWh/m ²]	Natural Gas Intensity [kWh/m ²]	Additional Fuel Intensity [kWh/m ²]	District Cooling Intensity [kWh/m ²]	District Heating Intensity [kWh/m ²]	Water Intensity [m ³ /m ²]
Lighting	78.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	26.11	102.70	0.05
Other	43.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	121.64	0.00	0.00	26.11	102.70	0.05

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m ²]	Natural Gas Intensity [kWh/m ²]	Additional Fuel Intensity [kWh/m ²]	District Cooling Intensity [kWh/m ²]	District Heating Intensity [kWh/m ²]	Water Intensity [m ³ /m ²]
Lighting	78.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	26.11	102.70	0.05
Other	43.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	121.64	0.00	0.00	26.11	102.70	0.05

Electric Loads Satisfied

	Electricity [kWh]	Percent Electricity [%]
Fuel-Fired Power Generation	0.000	0.00
High Temperature Geothermal*	0.000	0.00
Photovoltaic Power	0.000	0.00
Wind Power	0.000	0.00
Power Conversion	0.000	0.00
Net Decrease in On-Site Storage	0.000	0.00
Total On-Site Electric Sources	0.000	0.00
Electricity Coming From Utility	10744.773	100.00
Surplus Electricity Going To Utility	0.000	0.00
Net Electricity From Utility	10744.773	100.00
Total On-Site and Utility Electric Sources	10744.773	100.00
Total Electricity End Uses	10744.773	100.00

On-Site Thermal Sources

	Heat [kWh]	Percent Heat [%]
Water-Side Heat Recovery	0.00	
Air to Air Heat Recovery for Cooling	0.00	
Air to Air Heat Recovery for Heating	0.00	
High-Temperature Geothermal*	0.00	
Solar Water Thermal	0.00	
Solar Air Thermal	0.00	
Total On-Site Thermal Sources	0.00	

Water Source Summary

	Water [m3]	Percent Water [%]
Rainwater Collection	0.00	0.00
Condensate Collection	0.00	0.00
Groundwater Well	0.00	0.00
Total On Site Water Sources	0.00	0.00
-	-	-
Initial Storage	0.00	0.00
Final Storage	0.00	0.00
Change in Storage	0.00	0.00
-	-	-
Water Supplied by Utility	4.61	100.00
-	-	-
Total On Site, Change in Storage, and Utility Water Sources	4.61	100.00
Total Water End Uses	4.61	100.00

Setpoint Not Met Criteria

	Degrees [deltaC]
Tolerance for Zone Heating Setpoint Not Met Time	0.20
Tolerance for Zone Cooling Setpoint Not Met Time	0.20

Comfort and Setpoint Not Met Summary

	Facility [Hours]
Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	0.00
Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	0.00
Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	2260.00

Note 1: An asterisk (*) indicates that the feature is not yet implemented.

Table of Contents

[Top](#)

[Annual Building Utility Performance Summary](#)

[Input Verification and Results Summary](#)

[Demand End Use Components Summary](#)

[Adaptive Comfort Summary](#)

[Sensible Heat Gain Summary](#)

ZONE MEAN AIR TEMPERATURE [2864]

| [1125](#) |

ZONE MEAN RADIANT TEMPERATURE [2864]

| [1125](#) |

ZONE OPERATIVE TEMPERATURE [2864]

| [1125](#) |

Table of Contents

Report: **Input Verification and Results Summary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2019-02-17 17:13:23**

General

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus, Version 8.6.0-198c6a3cff, YMD=2019.02.17 17:13
RunPeriod	UNTITLED (01-01:31-12)
Weather File	Murcia - ESP SWEC WMO#=-084300

Latitude [deg]	37.79
Longitude [deg]	-0.8
Elevation [m]	62.00
Time Zone	1.00
North Axis Angle [deg]	0.00
Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

ENVELOPE**Window-Wall Ratio**

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Above Ground Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Window Opening Area [m2]	25.02	12.51	0.00	12.51	0.00
Gross Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00

Conditioned Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Above Ground Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Window Opening Area [m2]	25.02	12.51	0.00	12.51	0.00
Gross Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00

Skylight-Roof Ratio

	Total
Gross Roof Area [m2]	88.33
Skylight Area [m2]	0.00
Skylight-Roof Ratio [%]	0.00

PERFORMANCE**Zone Summary**

	Area [m ²]	Conditioned (Y/N)	Part of Total Floor Area (Y/ N)	Volume [m ³]	Multipliers	Above Ground Gross Wall Area [m ²]	Underground Gross Wall Area [m ²]	Window Glass Area [m ²]	Opening Area [m ²]	Lighting [W/m ²]	People [m ² per person]	Plug and Process [W/m ²]
1125	88.33	Yes	Yes	309.16	1.00	135.30	0.00	23.23	25.02	25.0000	9.01	11.7700
Total	88.33			309.16		135.30	0.00	23.23	25.02	25.0000	9.01	11.7700
Conditioned Total	88.33			309.16		135.30	0.00	23.23	25.02	25.0000	9.01	11.7700
Unconditioned Total	0.00			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00			
Not Part of Total	0.00			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00			

Table of ContentsReport: **Demand End Use Components Summary**For: **Entire Facility**Timestamp: **2019-02-17 17:13:23****End Uses**

	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	District Heating [W]	Water [m ³ /s]
Time of Peak	01-JAN-07:05	-	-	01-AUG-15:00	29-JAN-05:05	01-JAN-09:05
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	20273.39	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	9720.44	0.00	0.00
Interior Lighting	2208.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1039.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

		ng [W]	ng [W]																
11 25	01- AUG- 16:00	0.0 0	- 48 05. 89	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	62 6.0 2	22 08. 26	103 9.65	15 50. 12	0.0 0	233 6.41	0.00	0.00	- 0.0 0	0.0 0	0.00	- 295 4.56
To tal Fa cil ity	01- AUG- 16:00	0.0 0	- 48 05. 89	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	62 6.0 2	22 08. 26	103 9.65	15 50. 12	0.0 0	233 6.41	0.00	0.00	0.0 0	0.0 0	0.00	- 295 4.56

Peak Heating Sensible Heat Gain Components

	Time of Peak {TIM ESTAMP}	HV AC Zone Eq & Other Sensible Air Heating [W]	HV AC Zone Eq & Other Sensible Air Heating [W]	HV AC Terminal Unit Sensible Air Heating [W]	HV AC Terminal Unit Sensible Air Heating [W]	HV AC Input Heated Surface Heating [W]	HV AC Input Coiled Surface Cooling [W]	People Sensible Heat Addition [W]	Lights Sensible Heat Addition [W]	Equipment Sensible Heat Addition [W]	Window Heat Addition [W]	Interzone Air Transfer Heat Addition [W]	Infiltration Heat Addition [W]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Addition [W]	Equipment Sensible Heat Removal [W]	Window Heat Removal [W]	Interzone Air Transfer Heat Removal [W]	Infiltration Heat Removal [W]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Removal [W]
11 25	08- NOV- 05:07	235 94. 73	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	56.0 8	0.0 0	0.0 0	0.00	0.00	0.00	- 61 2.5 2	0.0 0	- 332 9.45	- 197 08.8 4
To tal Fa cil ity	08- NOV- 05:07	235 94. 73	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	56.0 8	0.0 0	0.0 0	0.00	0.00	0.00	- 61 2.5 2	0.0 0	- 332 9.45	- 197 08.8 4

Table of Contents

Report: **Adaptive Comfort Summary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2019-02-17 17:13:23**

Time Not Meeting the Adaptive Comfort Models during Occupied Hours

ASHRAE55 90% Acceptability Limits [Hours]	ASHRAE55 80% Acceptability Limits [Hours]	CEN15251 Category I Acceptability Limits [Hours]	CEN15251 Category II Acceptability Limits [Hours]	CEN15251 Category III Acceptability Limits [Hours]
---	---	--	---	--

Table of Contents

Report: **ZONE MEAN AIR TEMPERATURE [C] [2864]**

For: **1125**

Timestamp: **2019-02-17 17:13:23**

Values in table are in hours.

Time Bin Results

	- [hr]	1 [hr]	2 [hr]	3 [hr]	4 [hr]	5 [hr]	6 [hr]	7 [hr]	8 [hr]	9 [hr]	10 [hr]	11 [hr]	12 [hr]	13 [hr]	14 [hr]	15 [hr]	16 [hr]	17 [hr]	18 [hr]	19 [hr]	20 [hr]	- [hr]	- [hr]	
Interval Start	le ss than	12 .0 0<	13 .0 0<	14 .0 0<	15 .0 0<	16 .0 0<	17 .0 0<	18 .0 0<	19 .0 0<	20 .0 0<	21 .0 0<	22 .0 0<	23 .0 0<	24 .0 0<	25 .0 0<	26 .0 0<	27 .0 0<	28 .0 0<	29 .0 0<	30 .0 0<	31 .0 0<	e qual to or more than	R ow	
Interval End	1 2.0 0	13 .0 0>	14 .0 0>	15 .0 0>	16 .0 0>	17 .0 0>	18 .0 0>	19 .0 0>	20 .0 0>	21 .0 0>	22 .0 0>	23 .0 0>	24 .0 0>	25 .0 0>	26 .0 0>	27 .0 0>	28 .0 0>	29 .0 0>	30 .0 0>	31 .0 0>	32 .0 0>	3 2.0 0	To tal	
Januar	0.0 0	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	27 6.00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	0.0 00	27 6.00	

DATOS EDIFICIO MUY AISLADO O PASSIVHAUS (TIPO C)

Program Version: **EnergyPlus, Version 8.9.0-40101eaafd, YMD=2019.05.26 15:27**

Tabular Output Report in Format: **HTML**

Building: **Building**

Environment: **COMPARATIVA EDIFICIOS SIN AISLAMIENTO (O1-O1:31-12) ** Murcia - ESP SWEC
WMO#=084300**

Simulation Timestamp: **2019-05-26 15:27:41**

Table of Contents

Report: **Annual Building Utility Performance Summary**

For: **Entire Facility**

Timestamp: **2019-05-26 15:27:41**

Values gathered over 8760.00 hours

Site and Source Energy

	Total Energy [kWh]	Energy Per Total Building Area [kWh/m2]	Energy Per Conditioned Building Area [kWh/m2]
Total Site Energy	16168.22	183.04	183.04
Net Site Energy	16168.22	183.04	183.04
Total Source Energy	41654.56	471.58	471.58
Net Source Energy	41654.56	471.58	471.58

Site to Source Energy Conversion Factors

	Site=>Source Conversion Factor
Electricity	3.167
Natural Gas	1.084
District Cooling	1.056
District Heating	3.613

Total End Uses	10744.77	0.00	0.00	4680.38	743.07	4.61
----------------	----------	------	------	---------	--------	------

Note: District heat appears to be the principal heating source based on energy usage.

End Uses By Subcategory

	Subcategory	Electricity [kWh]	Natural Gas [kWh]	Additional Fuel [kWh]	District Cooling [kWh]	District Heating [kWh]	Water [m3]
Heating	General	0.00	0.00	0.00	0.00	475.38	0.00
Cooling	General	0.00	0.00	0.00	4680.38	0.00	0.00
Interior Lighting	ELECTRIC EQUIPMENT#1219#GeneralLights	6916.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	ELECTRIC EQUIPMENT#1219#05	3828.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	DHW 1219	0.00	0.00	0.00	0.00	267.69	4.61
Refrigeration	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Normalized Metrics

Utility Use Per Conditioned Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m2]	Natural Gas Intensity [kWh/m2]	Additional Fuel Intensity [kWh/m2]	District Cooling Intensity [kWh/m2]	District Heating Intensity [kWh/m2]	Water Intensity [m3/m2]
Lighting	78.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	52.99	8.41	0.05
Other	43.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	121.64	0.00	0.00	52.99	8.41	0.05

Utility Use Per Total Floor Area

	Electricity Intensity [kWh/m ²]	Natural Gas Intensity [kWh/m ²]	Additional Fuel Intensity [kWh/m ²]	District Cooling Intensity [kWh/m ²]	District Heating Intensity [kWh/m ²]	Water Intensity [m ³ /m ²]
Lighting	78.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HVAC	0.00	0.00	0.00	52.99	8.41	0.05
Other	43.34	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	121.64	0.00	0.00	52.99	8.41	0.05

Electric Loads Satisfied

	Electricity [kWh]	Percent Electricity [%]
Fuel-Fired Power Generation	0.000	0.00
High Temperature Geothermal*	0.000	0.00
Photovoltaic Power	0.000	0.00
Wind Power	0.000	0.00
Power Conversion	0.000	0.00
Net Decrease in On-Site Storage	0.000	0.00
Total On-Site Electric Sources	0.000	0.00
Electricity Coming From Utility	10744.773	100.00
Surplus Electricity Going To Utility	0.000	0.00
Net Electricity From Utility	10744.773	100.00
Total On-Site and Utility Electric Sources	10744.773	100.00
Total Electricity End Uses	10744.773	100.00

On-Site Thermal Sources

	Heat [kWh]	Percent Heat [%]
Water-Side Heat Recovery	0.00	
Air to Air Heat Recovery for Cooling	0.00	
Air to Air Heat Recovery for Heating	0.00	
High-Temperature Geothermal*	0.00	
Solar Water Thermal	0.00	
Solar Air Thermal	0.00	

Total On-Site Thermal Sources	0.00
-------------------------------	------

Water Source Summary

	Water [m3]	Percent Water [%]
Rainwater Collection	0.00	0.00
Condensate Collection	0.00	0.00
Groundwater Well	0.00	0.00
Total On Site Water Sources	0.00	0.00
-	-	-
Initial Storage	0.00	0.00
Final Storage	0.00	0.00
Change in Storage	0.00	0.00
-	-	-
Water Supplied by Utility	4.61	100.00
-	-	-
Total On Site, Change in Storage, and Utility Water Sources	4.61	100.00
Total Water End Uses	4.61	100.00

Setpoint Not Met Criteria

	Degrees [deltaC]
Tolerance for Zone Heating Setpoint Not Met Time	0.20
Tolerance for Zone Cooling Setpoint Not Met Time	0.20

Comfort and Setpoint Not Met Summary

	Facility [Hours]
Time Setpoint Not Met During Occupied Heating	0.00
Time Setpoint Not Met During Occupied Cooling	0.00
Time Not Comfortable Based on Simple ASHRAE 55-2004	184.80

Note 1: An asterisk (*) indicates that the feature is not yet implemented.

Table of Contents[Top](#)[Annual Building Utility Performance Summary](#)[Input Verification and Results Summary](#)[Demand End Use Components Summary](#)[Adaptive Comfort Summary](#)[Sensible Heat Gain Summary](#)[Table of Contents](#)Report: **Input Verification and Results Summary**For: **Entire Facility**Timestamp: **2019-05-26 15:27:41****General**

	Value
Program Version and Build	EnergyPlus, Version 8.9.0-40101eaafd, YMD=2019.05.26 15:27
RunPeriod	COMPARATIVA EDIFICIOS SIN AISLAMIENTO (01-01:31-12)
Weather File	Murcia - ESP SWEC WMO#=084300
Latitude [deg]	37.79
Longitude [deg]	-0.8
Elevation [m]	62.00
Time Zone	1.00
North Axis Angle [deg]	0.00
Rotation for Appendix G [deg]	0.00
Hours Simulated [hrs]	8760.00

ENVELOPE**Window-Wall Ratio**

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Above Ground Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Window Opening Area [m2]	25.02	12.51	0.00	12.51	0.00
Gross Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00

Conditioned Window-Wall Ratio

	Total	North (315 to 45 deg)	East (45 to 135 deg)	South (135 to 225 deg)	West (225 to 315 deg)
Gross Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Above Ground Wall Area [m2]	135.30	41.70	25.95	41.70	25.95
Window Opening Area [m2]	25.02	12.51	0.00	12.51	0.00
Gross Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00
Above Ground Window-Wall Ratio [%]	18.49	30.00	0.00	30.00	0.00

Skylight-Roof Ratio

	Total
Gross Roof Area [m2]	88.33
Skylight Area [m2]	0.00
Skylight-Roof Ratio [%]	0.00

PERFORMANCE**Zone Summary**

	Area [m2]	Conditioned (Y/N)	Part of Total Floor Area (Y/N)	Volume [m3]	Multipliers	Above Ground Gross Wall Area [m2]	Underground Gross Wall Area [m2]	Window Glass Area [m2]	Opening Area [m2]	Lighting [W/m2]	People [m2 per person]	Plug and Process [W/m2]
1219	88.33	Yes	Yes	309.16	1.00	135.30	0.00	23.23	25.02	25.0000	9.01	11.7700
Total	88.33			309.16		135.30	0.00	23.23	25.02	25.0000	9.01	11.7700
Conditioned Total	88.33			309.16		135.30	0.00	23.23	25.02	25.0000	9.01	11.7700
Unconditioned Total	0.00			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00			
Not Part of Total	0.00			0.00		0.00	0.00	0.00	0.00			

Table of ContentsReport: **Demand End Use Components Summary**For: **Entire Facility**Timestamp: **2019-05-26 15:27:41****End Uses**

	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	District Heating [W]	Water [m3/s]
Time of Peak	01-JAN-07:05	-	-	01-AUG-15:00	05-FEB-05:05	01-JAN-09:05
Heating	0.00	0.00	0.00	0.00	7290.17	0.00
Cooling	0.00	0.00	0.00	7446.57	0.00	0.00
Interior Lighting	2208.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	1039.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total End Uses	3247.91	0.00	0.00	7446.57	7290.17	0.00

End Uses By Subcategory

	Subcategory	Electricity [W]	Natural Gas [W]	Propane [W]	District Cooling [W]	District Heating [W]	Water [m3/s]
Heating	General	0.00	0.00	0.00	0.00	7290.17	0.00
Cooling	General	0.00	0.00	0.00	7446.57	0.00	0.00
Interior Lighting	ELECTRIC EQUIPMENT#1219#GeneralLights	2208.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Lighting	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Interior Equipment	ELECTRIC EQUIPMENT#1219#05	1039.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Exterior Equipment	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fans	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pumps	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Rejection	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Humidification	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Heat Recovery	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Water Systems	DHW 1219	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Refrigeration	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Generators	General	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Table of ContentsReport: **Adaptive Comfort Summary**For: **Entire Facility**Timestamp: **2019-05-26 15:27:41****Time Not Meeting the Adaptive Comfort Models during Occupied Hours**

ASHRAE55 90% Acceptability Limits [Hours]	ASHRAE55 80% Acceptability Limits [Hours]	CEN15251 Category I Acceptability Limits [Hours]	CEN15251 Category II Acceptability Limits [Hours]	CEN15251 Category III Acceptability Limits [Hours]
---	---	--	---	--

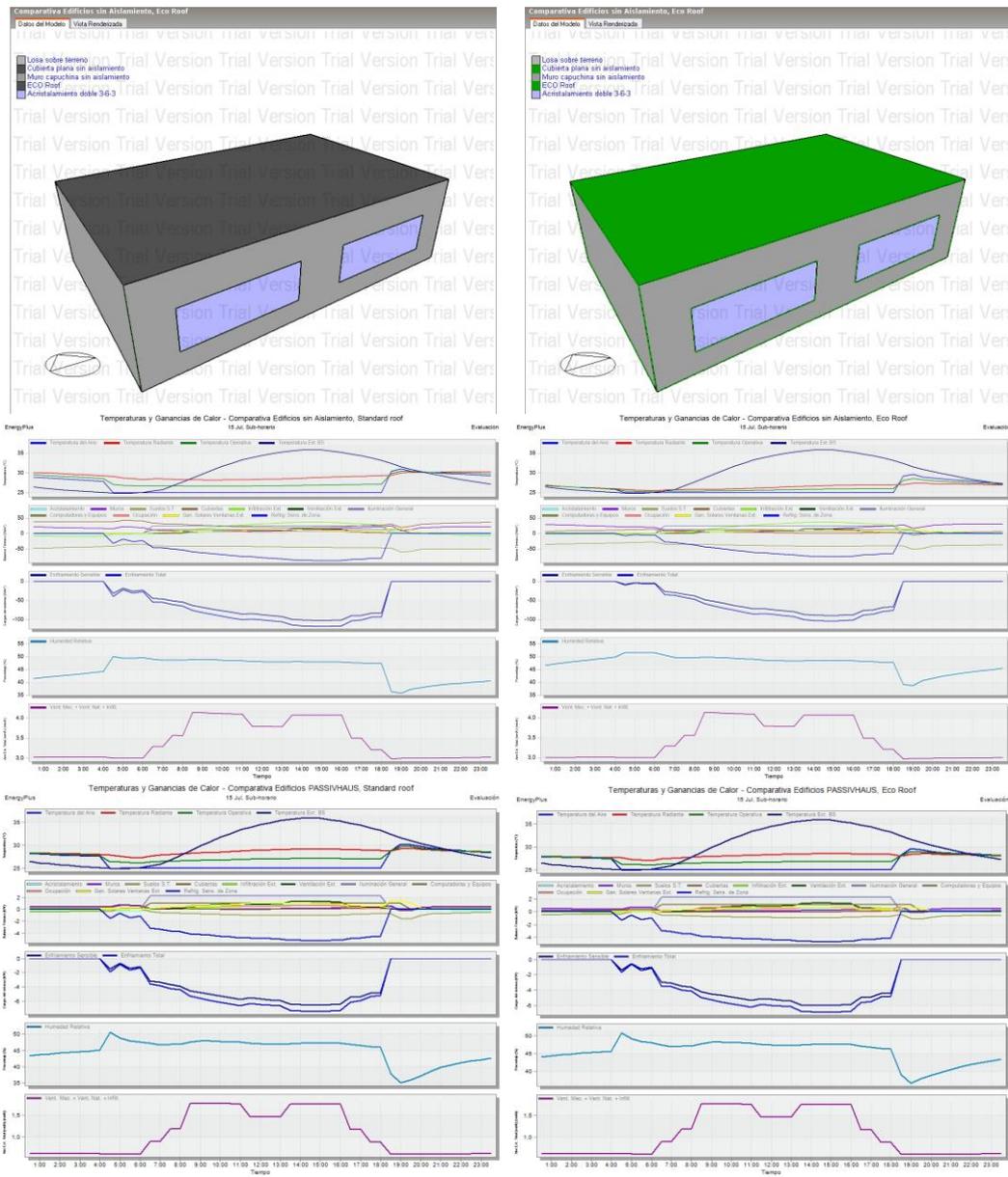
		ng [W]	ng [W]																
12 19	26- JUL- 04:62	0.0 0	- 42 18. 96	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	56.0 8	0.0 0	0.0 0	0.00	428 7.40	0.00	- 73. 95	0.0 0	- 50.5 8	0.00
To tal Fa cil ity	26- JUL- 04:62	0.0 0	- 42 18. 96	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	56.0 8	0.0 0	0.0 0	0.00	428 7.40	0.00	- 73. 95	0.0 0	- 50.5 8	0.00

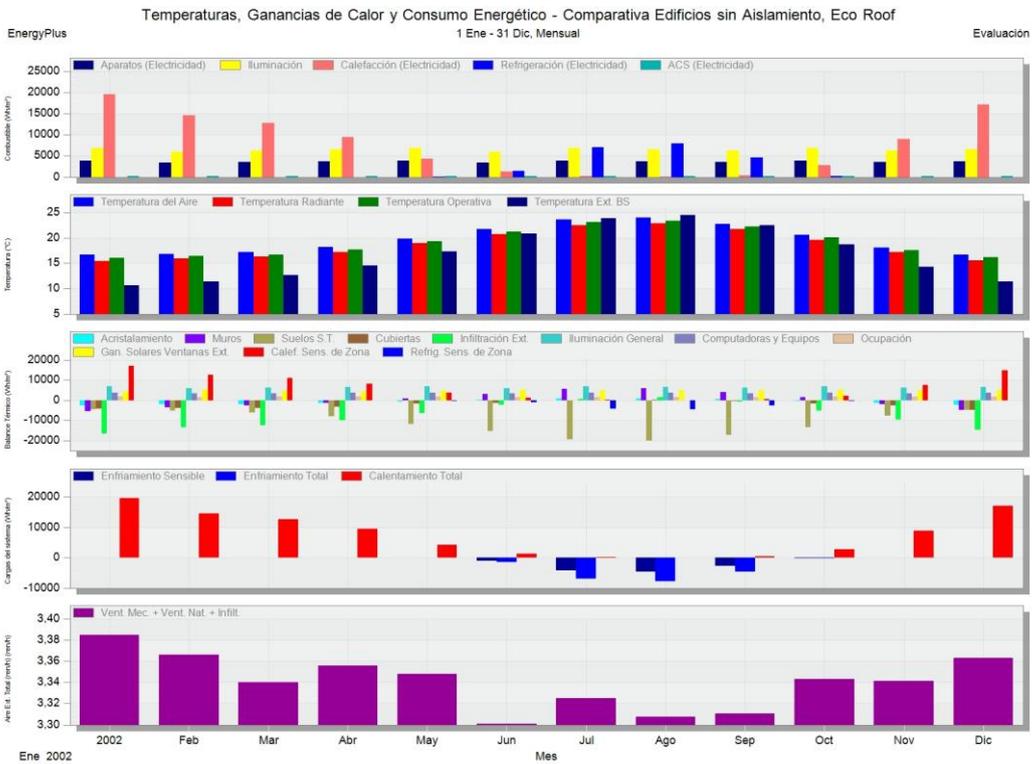
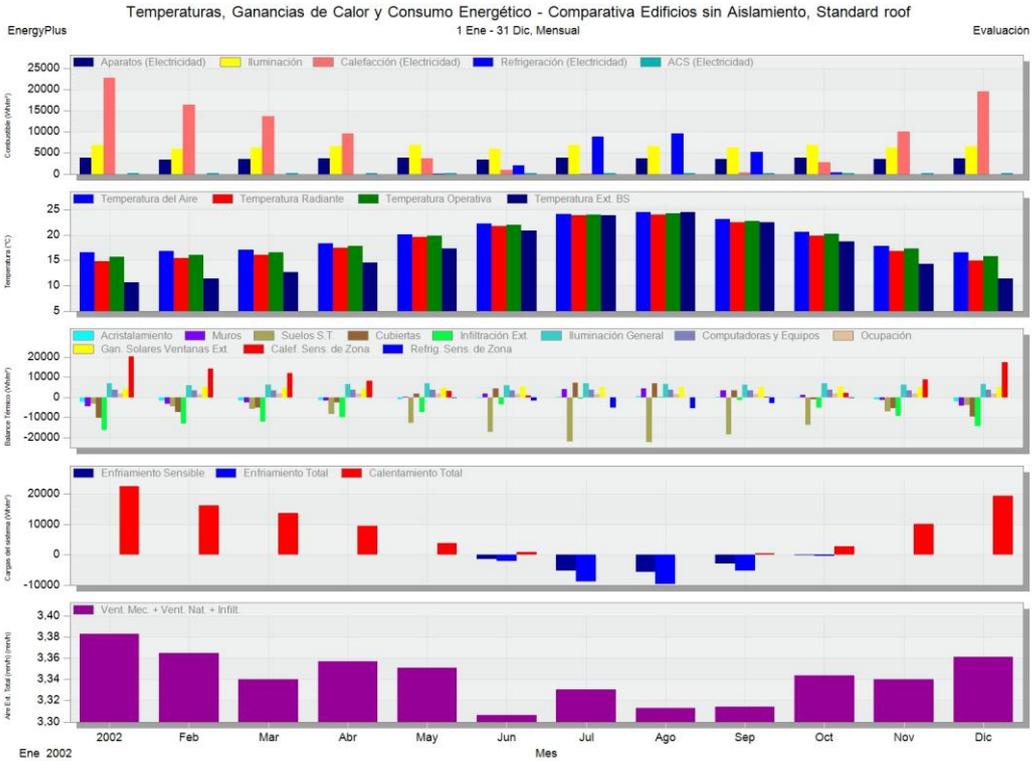
Peak Heating Sensible Heat Gain Components

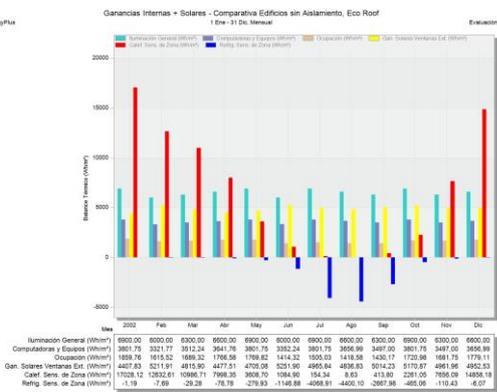
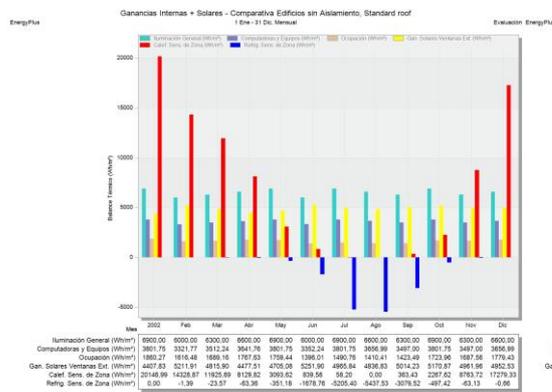
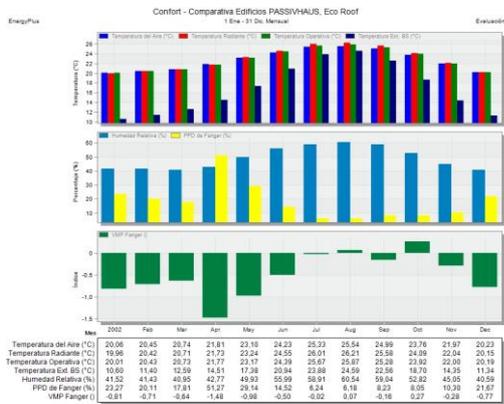
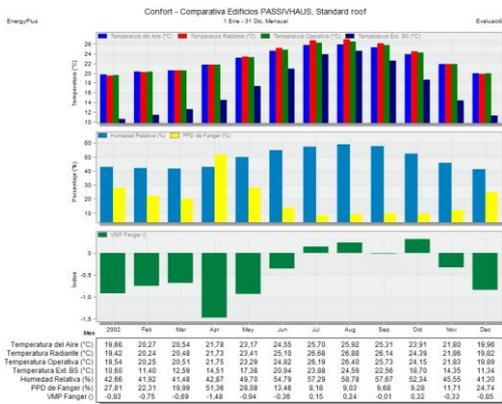
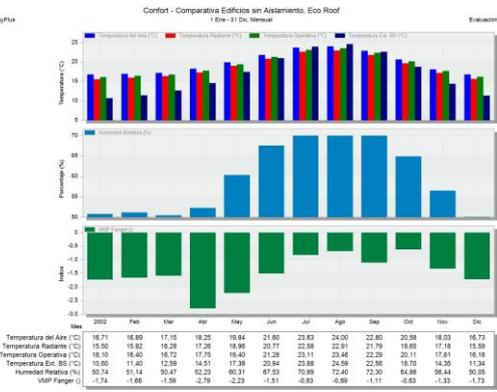
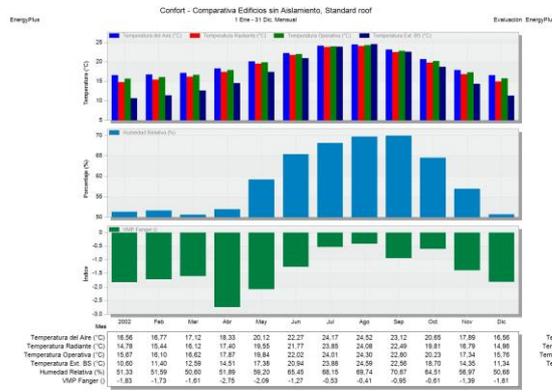
	Time of Peak {TIM ESTAMP}	H V A C Zone Eq & Other Sensible Air Heating [W]	H V A C Zone Eq & Other Sensible Air Cooling [W]	HV AC Terminal Unit Sensible Air Heating [W]	HV AC Terminal Unit Sensible Air Cooling [W]	H V A C Input Heated Surface Heating [W]	H V A C Input Cooled Surface Cooling [W]	People Sensible Heat Addition [W]	Lights Sensible Heat Addition [W]	Equipment Sensible Heat Addition [W]	Window Heat Addition [W]	Interzone Air Transfer Heat Addition [W]	Infiltration Heat Addition [W]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Addition [W]	Equipment Sensible Heat Removal [W]	Window Heat Removal [W]	Interzone Air Transfer Heat Removal [W]	Infiltration Heat Removal [W]	Opaque Surface Conduction and Other Heat Removal [W]
12 19	19- FEB- 05:08	69 79. 17	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	56.0 8	0.0 0	0.0 0	0.00	0.00	0.00	- 33 1.2 4	0.0 0	- 863. 58	- 584 0.43
To tal Fa cil ity	19- FEB- 05:08	69 79. 17	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	0.0 0	56.0 8	0.0 0	0.0 0	0.00	0.00	0.00	- 33 1.2 4	0.0 0	- 863. 58	- 584 0.43

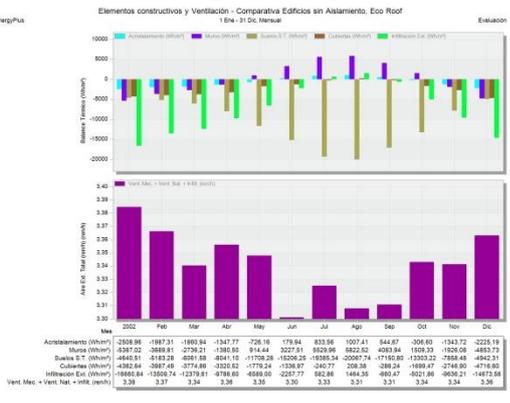
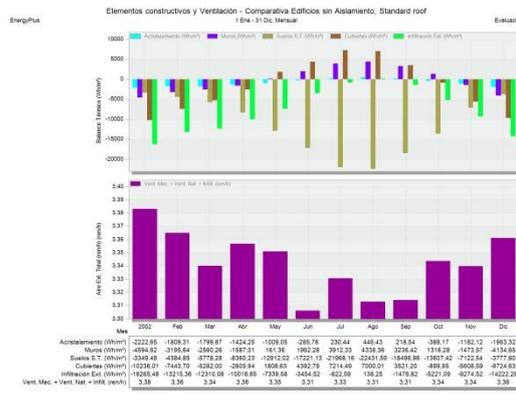
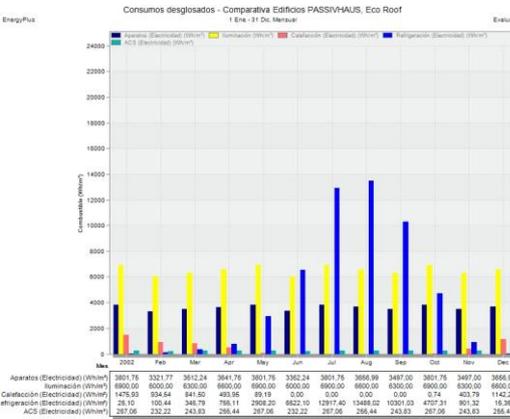
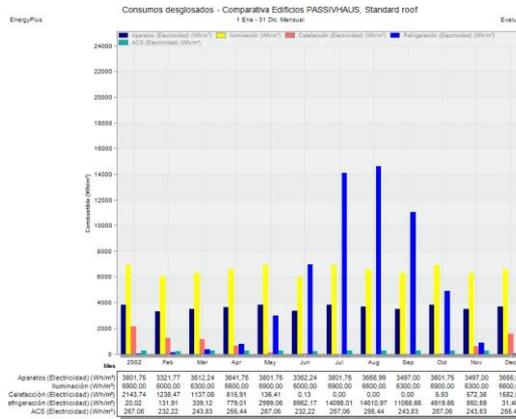
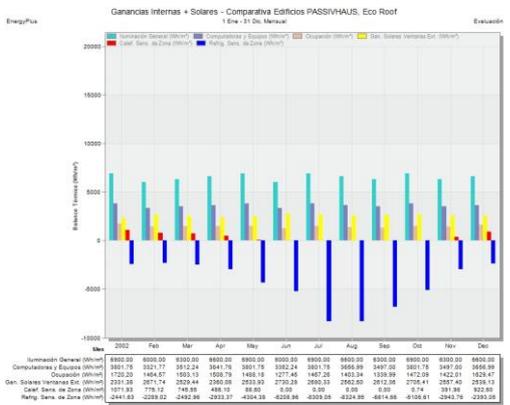
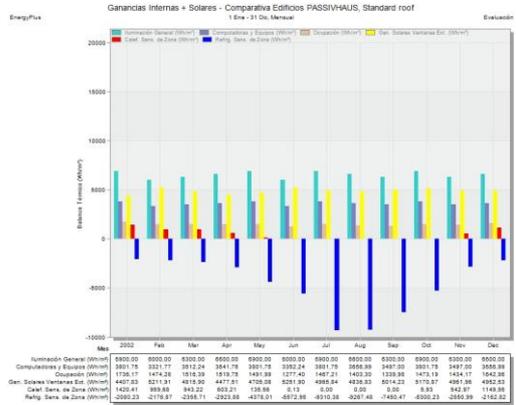
Informe generado por DesignBuilder v6.1.0.006 en 26/05/2019 15:24:57

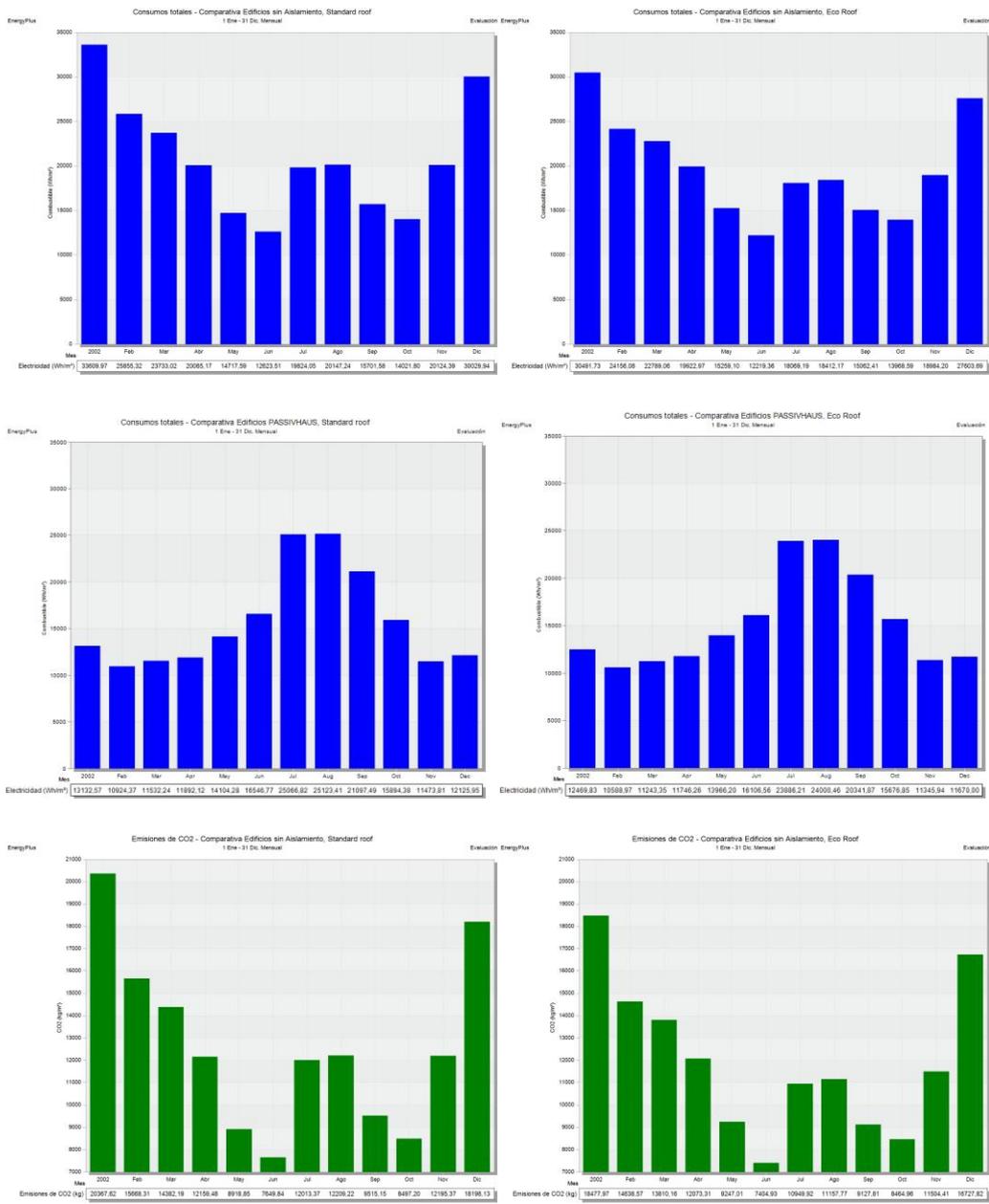
Árbol del modelo Comparativa Edificios con y sin Aislamiento
Asesor: Joaquin Ruiz

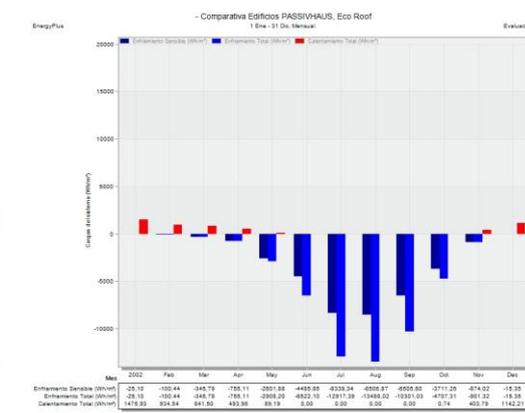
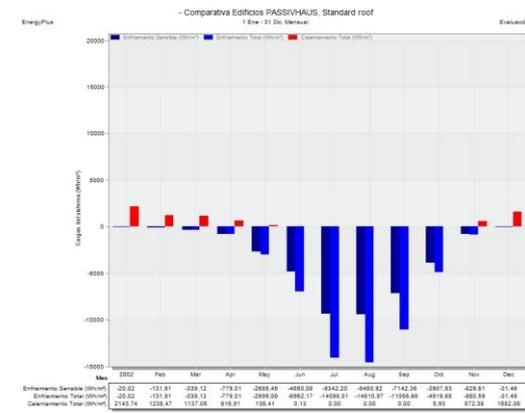
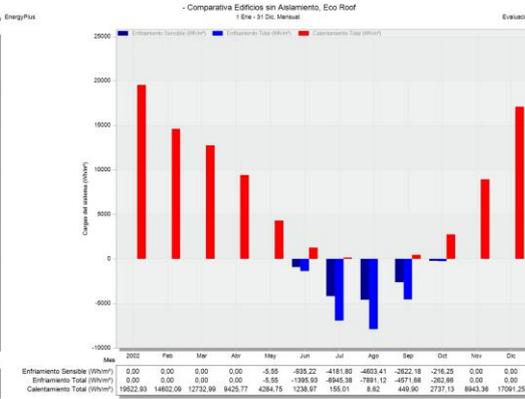
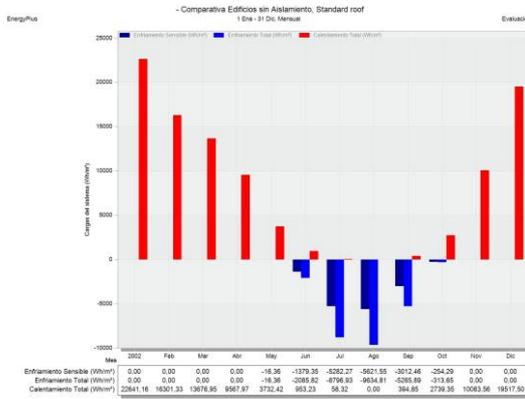
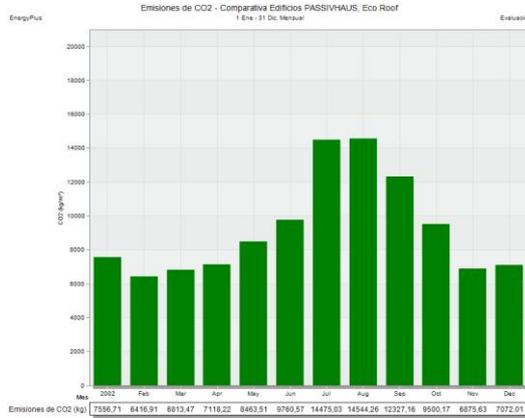
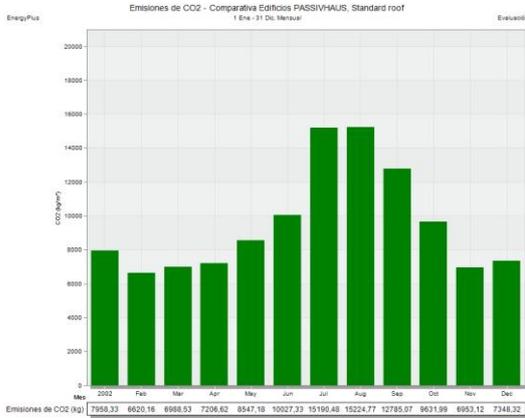


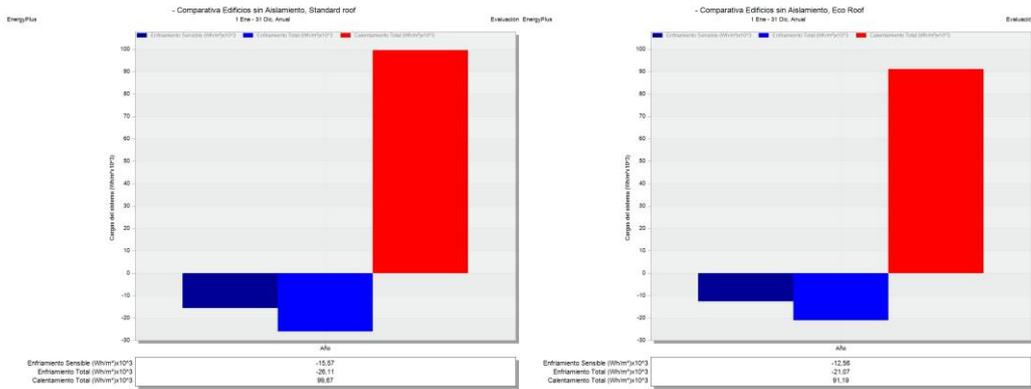
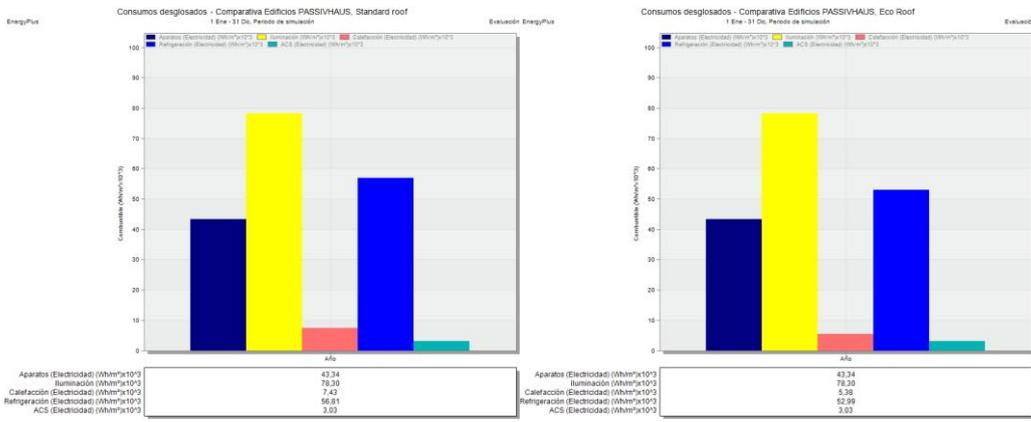
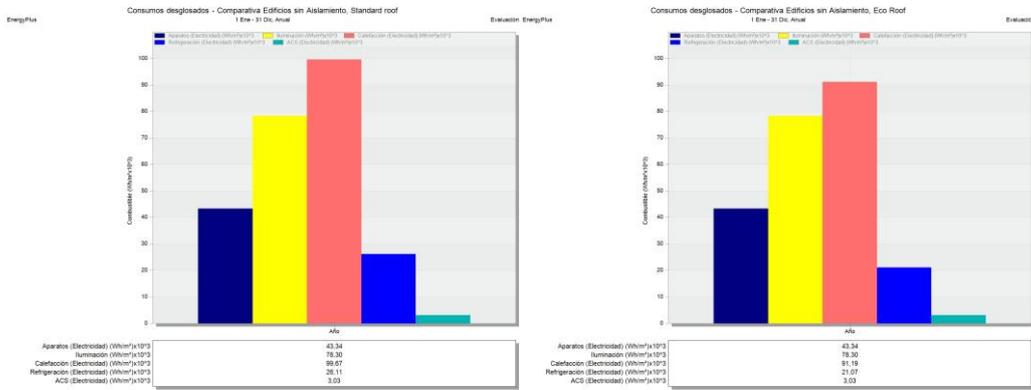


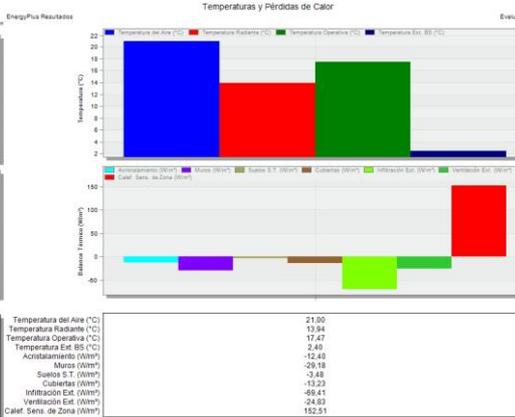
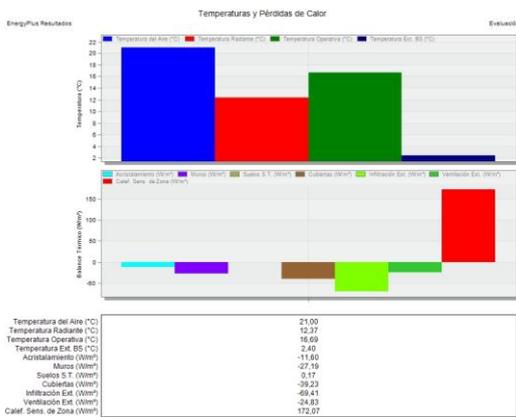
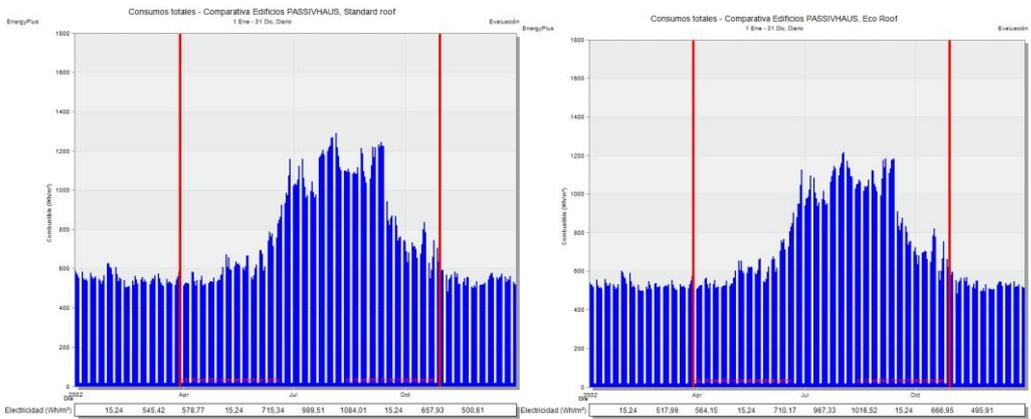
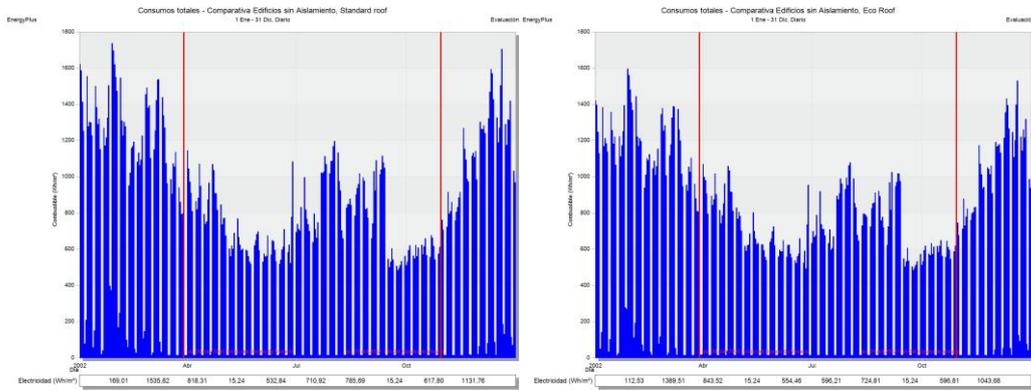


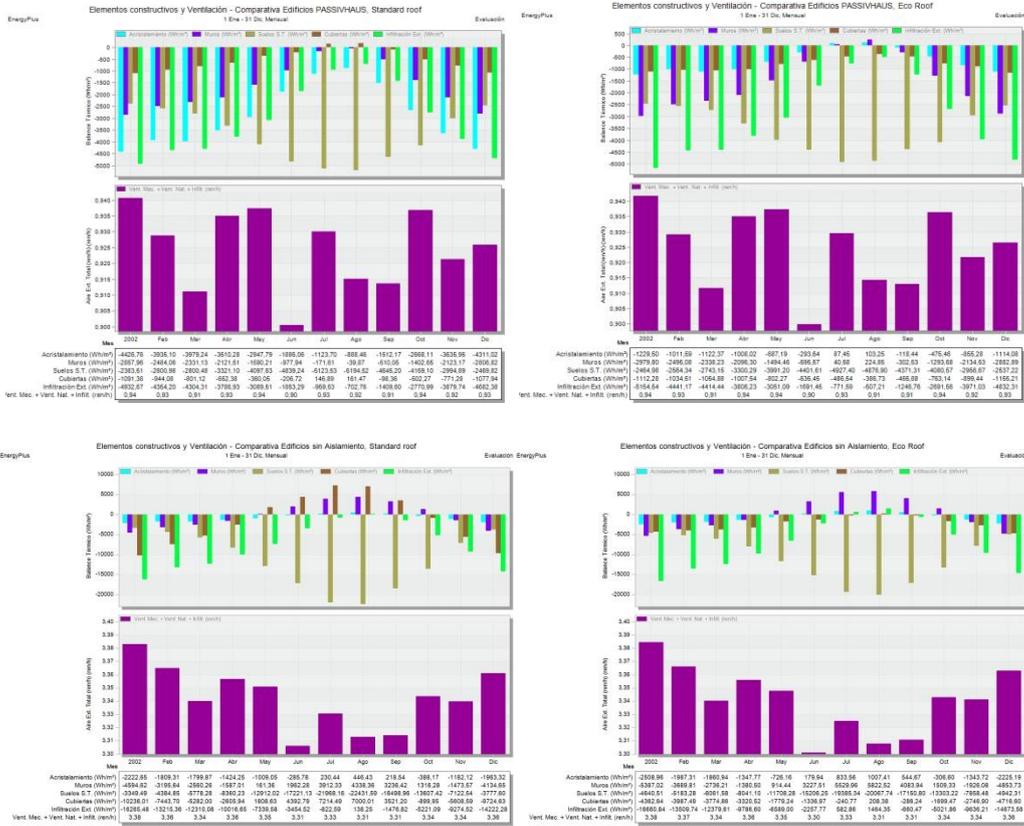












Informe generado por DesignBuilder v6.1.0.006 en 26/05/2019 15:24:57

Árbol del modelo Comparativa Edificios con y sin Aislamiento
 Asesor: Joaquin Ruiz

