



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID, ETSAM

# EFECTO DE LAS CUBIERTAS AJARDINADAS SOBRE EL MICROCLIMA URBANO DE VERANO

## Tesis Doctoral

EFFECT OF GREEN ROOFS ON URBAN SUMMER MICROCLIMATE

SUSANA SAIZ ALCAZAR SAIZ ALCAZAR, ARQUITECTO

DIRECTORES DE TESIS:

D.FRANCISCO JAVIER NEILA GONZALEZ, DOCTOR ARQUITECTO

DÑA. FRANCESCA OLIVIERI, DOCTOR ARQUITECTO



**POLITÉCNICA**

Tribunal nombrado por el Sr. Rector Magfco. de la Universidad Politécnica de Madrid, el día.....de.....de 20....

Presidente:\_\_\_\_\_

Vocal: \_\_\_\_\_

Vocal:\_\_\_\_\_

Vocal:\_\_\_\_\_

Secretario:\_\_\_\_\_

Suplente:\_\_\_\_\_

Suplente:\_\_\_\_\_

Realizado el acto de defensa y lectura de la Tesis el día.....de.....de 20....  
en la E.T.S.I. /Facultad.....

Calificación .....

EL PRESIDENTE

LOS VOCALES

EL SECRETARIO

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA ARQUITECTÓNICAS**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA DE MADRID (E.T.S.A.M.)**



## **EFFECTO DE LAS CUBIERTAS AJARDINADAS SOBRE EL MICROCLIMA URBANO DE VERANO**

**AUTOR:**

SUSANA SAIZ ALCAZAR, ARQUITECTO

**DIRECTORES DE TESIS:**

D. FRANCISCO JAVIER NÉILA GONZALEZ, DOCTOR ARQUITECTO

DÑA. FRANCESCA OLIVIERI, DOCTOR ARQUITECTO

2015

## AGRADECIMIENTOS

Esta tesis no hubiese sido posible sin la colaboración de Chris Kennedy que me apoyó y orientó en mi decisión de investigar sobre las cubiertas ajardinadas y me dio su ayuda durante mi estancia en U of T. Agradezco a Brad Bass de la Universidad de Toronto, que me dió la primera oportunidad de tomar contacto con las estrategias de naturalización en las ciudades y los fundamentos y herramientas para poder iniciarme en su cuantificación.

Especial agradecimiento a Arup, que facilitó el desarrollo de la investigación mediante fondos internos destinados al desarrollo de nuevas líneas de investigación y desarrollo y sin los cuales no hubiese podido disponer del tiempo y recursos necesarios para completar mi estudio, especialmente a Marta Fernández que siempre ha apoyado y reconocido este esfuerzo.

A mis directores de tesis, D. Javier Neila y Dña. Francesca Olivieri por animarme y darme guía durante el proceso y facilitarme los recursos necesarios para la investigación.

Y muy especialmente a mi familia, que me ha dado siempre su apoyo, especialmente durante las fases iniciales de esta investigación en la Universidad de Toronto, durante los 6 años de mi estancia fuera siempre estuvieron a mi lado y me dieron apoyo desde la distancia.

Finalmente a mis hijos, que me enseñan cada día el verdadero sentido de la vida y me dan cada día la ilusión de superarme a mí misma y dar lo mejor de mí.

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>I</b>
<b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA .....	2
1.2 OBJETO: EL ENTORNO URBANO .....	3
1.3 ESTRATEGIAS DE NATURALIZACIÓN.....	6
<b>2. CUBIERTAS AJARDINADAS: SERVICIOS DADOS AL ECOSISTEMA .....</b>	<b>10</b>
2.1 INTEGRACIÓN DE CUBIERTAS AJARDINADAS EN LA TRAMA URBANA .....	26
<b>3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....</b>	<b>31</b>
3.1 OBJETIVO PRINCIPAL .....	31
3.2 OBJETIVOS PARCIALES .....	31
<b>4. HIPÓTESIS DE PARTIDA .....</b>	<b>32</b>
<b>5. METODOLOGÍA .....</b>	<b>33</b>
<b>6. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>37</b>
6.1 CLIMA.....	37
6.2 MICROCLIMA: DEFINICIÓN Y FACTORES QUE LO DETERMINAN .....	39
6.2.1 <i>Microclima</i> .....	39
6.2.2 <i>Escala</i> .....	42
6.2.3 <i>Fenómenos físicos</i> .....	44
6.2.4 <i>Elementos bióticos</i> .....	49
6.2.5 <i>Balance energético</i> .....	53
6.2.6 <i>Parámetros característicos</i> .....	56
6.2.7 <i>Factores morfológicos</i> .....	58

6.2.8	<i>Factores antropogénicos</i> .....	66
6.3	EL CONFORT TÉRMICO .....	68
<b>7.</b>	<b>INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS VEGETALES EN EL BALANCE ENERGÉTICO DEL CAÑÓN URBANO .....</b>	<b>76</b>
7.1	EFFECTO DE LA VEGETACION SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR .....	78
7.1.2	<i>Transmitancia, absorptancia y reflectancia</i> .....	78
7.1.1	<i>Albedo y emitancia</i> .....	83
7.2	INFLUENCIA SOBRE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	84
7.3	INFLUENCIA SOBRE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AIRE.....	86
<b>8.</b>	<b>MÉTODO DE ANÁLISIS: HERRAMIENTAS Y MODELOS.....</b>	<b>91</b>
8.1	MODELOS MICROCLIMÁTICOS URBANOS.....	92
8.1.1	<i>Modelos basados en Herramientas CFD</i> .....	95
8.1.2	<i>Modelización del efecto de la vegetación</i> .....	96
8.2	MODELOS ENERGÉTICOS: BUILDING ENERGY MODEL ( BEM).....	101
8.3	HERRAMIENTA ENVI-MET V4 .....	103
<b>9.</b>	<b>ESTUDIO TEÓRICO.....</b>	<b>114</b>
9.1	DEFINICIÓN DEL SISTEMA .....	114
9.2	TRAMA URBANA.....	121
9.3	MICROCLIMA .....	124
9.4	CASO DE ESTUDIO .....	124
9.5	ENTRADA DE DATOS EN LA HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN ENVI-MET 4.....	134
9.6	ANÁLISIS ITERATIVO .....	139
9.7	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	140
9.8	CONCLUSIONES PARCIALES .....	154
9.8.1	<i>herramienta</i> .....	154
9.8.2	<i>modelo</i> .....	155
<b>10.</b>	<b>ESTUDIO EXPERIMENTAL .....</b>	<b>156</b>

10.1	SELECCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO .....	157
10.2	EXCLUSIONES Y LIMITACIONES .....	159
10.3	CAMPAÑA DE MEDICIÓN .....	160
10.3.1	<i>Toma de datos</i> .....	163
10.4	MODELO ENVIMET.....	164
10.5	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	167
10.6	CONCLUSIONES PARCIALES .....	178
<b>11.</b>	<b>ESTUDIO ENERGÉTICO.....</b>	<b>179</b>
11.1	DATOS DE ENTRADA .....	179
11.2	RESULTADOS .....	181
<b>12.</b>	<b>CONCLUSIONS.....</b>	<b>184</b>
<b>13.</b>	<b>LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA.....</b>	<b>188</b>
<b>14.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>189</b>

## EXECUTIVE SUMMARY

Climate Change is posing an urgency in the development of strategies able not only to mitigate but also adapt to the effects that this global problem is evidencing around the world. Heat waves, flooding and severe draughts increase the vulnerability of population, and this is especially critical in urban settlements. This has been extensively studied over the past decades and addressed from different perspectives. Its study ranges from the regional heat island analysis to the building scale. Its understanding requires a deep analysis of the factors and the strategies which can offset it and this requires the understanding of the physical and dimensional components of the phenomena.

In the search of solutions to this problem, green infrastructure elements such as green roofs, walls and urban forests arise as strategies able provide multiple regulating ecosystem services to the urban environment able to cope with climate change effects. This includes storm water management, heat island effect control, improvement of air and water quality, noise reduction, and the reduction of the ecological footprint of the cities.

Over the last decade, multiple studies have been developed to evaluate and quantify the ecosystem services provided by green roofs, however, specific regulating services addressing urban microclimate and their impact on the urban dwellers have not been widely quantified.

This research tries to contribute to fill this gap and analyzes the effects of green roofs and urban forests on urban microclimate at pedestrian level, quantifying its potential for regulating ambient temperature in hot season in Mediterranean –continental climates. The study is divided into a sequence of analysis where the critical factors affecting the performance of the green roof system on the microclimate are identified and the effects of the green roof is tested in a real case study.

The first step has been the definition of the object of study, through the analysis and review of theoretical and empirical papers that investigate the effects of covers landscaped in the built



environment, in the context of its use as a tool for adaptation and mitigation of the impact of climate change on cities and urban development. This literature review, reveals the great potential of the plant systems as a tool for passive design capable of improving the climatic and microclimatic conditions in the cities, as well as its positive impact on the energy performance of buildings, but also the need for further analysis at the street scale where climate, urban surfaces and materials, and vegetation converge. This analysis requires a methodology where the thermal buildings response, the variations in the patterns of wind and the interaction of the vegetation are integrated, so a quantitative analysis can help to define the most effective strategies to achieve liveable urban spaces and collaterally, the improvement of the surrounding buildings energy performance. In this specific scale research is needed and should be customized to every climate, urban condition and nature based strategy.

In this context, the main objective for this research was the quantitative assessment of the Green roof impact on the urban microclimate at a neighbourhood scale in summer conditions in Mediterranean- continental climates.

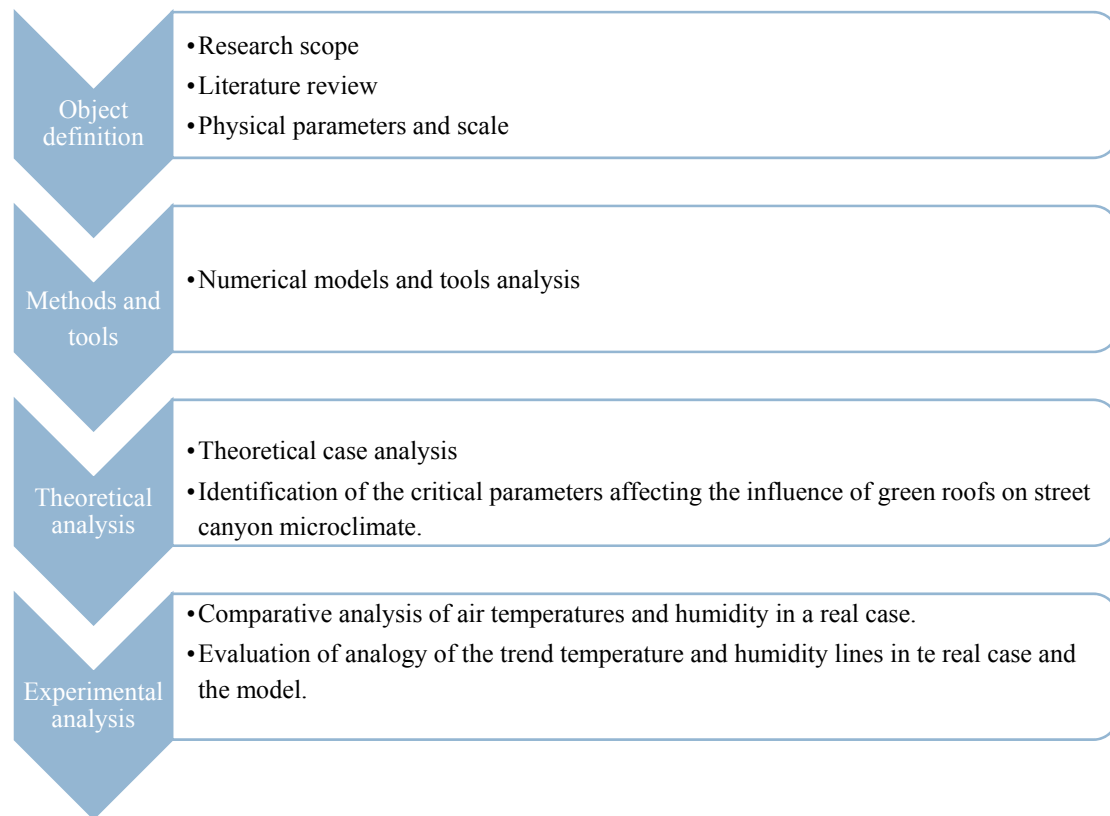
For the achievement of this main objective, the following secondary objectives have been set:

- Identify the numerical models and calculation tools able to capture the effect of the roof garden on the microclimate.
- Identify the enhancing or limiting parameter affecting this effect.
- Quantification of the impact of the microclimate created on the energy consumption of buildings surrounding the street canyon analysed.

The main hypothesis behind this research and where the above objectives are founded on is as follows:

"An extensive roof installed in medium height buildings favours the establishment of microclimates at the pedestrian level and reduces the temperatures in the urban environment where they are located."

For the purpose of verifying the above hypothesis and achieving the proposed objectives the following methodology has been set:



The search for suitable tools and models for meeting the objectives of this analysis has led to ENVI-met v4 as the most suitable software for this research because of its capacity for reproducing the complexity of the physical phenomena which determines a specific microclimate without the large computational requirements that traditional models based in Computational Fluid Dynamics tools require. ENVI-met is a three-dimensional micro-climate model designed to simulate the surface-plant-air interactions in urban environments. Based in the fundamental equations representing, mass, energy and momentum conservation, the software has the capacity of representing the complex phenomena characterizing the microclimate in urban canyons, overcoming the challenge posed by the computing requirements of a full calculus based on finite elements done via traditional computational fluid dynamics tools.

Once the analysis tool has been defined, a first set of analysis has been developed to identify the main parameters affecting the green roof influence on the microclimate. In this analysis,

two different scenarios are compared. A neighborhood with standard concrete tile roof and the same configuration substituting the concrete tile by an extensive green roof.

Once the scenarios have been modeled, different iterations have been run to identify the influence of different wind patterns, solar exposure and roof vegetation type on the microclimate, since those are the most relevant variables affecting urban microclimates according to the literature analyzed. These analysis have been run to check the conditions under which the effects of green roofs get significance and to identify both, the factors limiting and enhancing the cooling effect provided by green roofs at pedestrian level.

Since ENVI-met V4 is a predictive software, the first step of the theoretical analysis has been the definition of the initial weather conditions which are then used as starting point by the software, which generates its own daily temperature and humidity profile based on the location of the building, geometry, vegetation and the surfaces physical characteristics. The base geometry used for this first analysis has been based on a typical urban layout structure located in Madrid, an orthogonal net with the main streets oriented East-West to ease the analysis of solar radiation in the different points of the model. This layout represents a typical urban neighborhood, with street canyons keeping an aspect ratio between 0.5 and 1 and high sky view factor to ensure correct sun access to the streets and buildings and work with typical wind flow patterns. Finally, the roof vegetation has been defined in terms of foliage density known as Leaf Area Density (LAD) and defined as the total one-sided leaf area per unit of layer volume. This index is the most relevant vegetation characteristic for the purpose of calculating the effect of vegetation on wind and solar radiation as well as the energy consumed during its metabolic processes.

The building as usual (BAU) configuring the urban layout has been defined with standard concrete tile roofs, considering 0.3 albedo. Walls have been set with albedo 0.2 (typical brick wall construction) and adiabatic to avoid interference caused by thermal interchanges with the building indoor environment. For the proposed case, the same geometry and building characteristics have been kept. The only change is the roof surface coverage. The concrete tile

on the roof has been substituted by an extensive green roof covered with drought tolerant plants, typical in Madrid climate, and characterized by their LAD.

The different scenarios analysed are based in the variation of the wind speed and the LAD of the roof. The results have been recorded under different sun exposure conditions.

Simulations were run for the typical summer wind patterns. For Madrid summer winds are characterized by south-west prevalent direction ranging from 3 to 0 m/s. Simulations were run for 3, 2, 1 and 0 m/s at urban canopy level above the roofs. Results taken at 1.5 m above the ground showed that the green roof effect was lower with higher wind speeds and in any case the effect of the green roof on the air temperatures exceeded air temperature reductions higher than 1°C. Relative humidity presented no variations when comparing the different scenarios.

For the analysis at 0 m/s, ENVI-met generated error and no results were obtained. Different simulations showed that under 0.5 m/s turbulence increased dramatically and the model became unstable and unable to produce reliable results. This is due to the turbulence model embedded in the software which is not valid for low wind speeds.

The effect of the different foliage densities was also tested in the model. Three different alternatives were compared against the concrete roof: green roof with LAD 0.3 (typical grass or sedum), 1.5 (typical mixed plants) and 2.5 (tree mass). The results showed very relevant temperature differences between the different LAD alternatives analyzed. Results show temperature variations ranging between 3 and 5 °C when comparing the standard concrete roof with albedo 0, 3 with the vegetated roof and vegetated mass, showing the relevance of the LAD on the effects of green roofs on microclimate. This matches the data reported in existing literature and empirical studies and confirms the relevance of the LAD in the roof effect on the surrounding microclimate.

The results of the theoretical analysis have reached the following initial conclusions related to both, the simulation tool and the model results:

- In relation to the tool ENVI-met, some limitations for the analysis have been observed. In first place, the rigid structure of the geometry, the data bases and the grid size, limit the scale and resolution of the analysis not allowing the development of large urban areas. On the other hand the ENVI-met structure enables the development of this type of complex simulation within reasonable times and computational requirements for the purpose of this analysis. Additionally, the model is unable to run simulations at wind speeds lower than 0.5 m/s, and even at this speed, the results are not reliable because the turbulences generated by the model that made impossible to extract clear temperature differences between the concrete and green roof scenarios. Besides the above limitations, the wind patterns and temperature profiles generated by ENVI-met are in agreement with previous studies identifying wind patterns in urban canyons with similar characteristics and aspect ratio. Therefore the software has shown a good capacity for reproducing the wind effects in the street canyons and seems to capture the cooling effect produced by the green roof.
- In relation to the model, the results reveals the influence of wind, radiation and LAD on air temperature in urban canyons with aspect ratio comprised between 0.5 and 1. Being the effect of the green roof more noticeable in shaded urban canyons with aspect ratio 1 and wind speeds of 1 m/s. In no case the reductions in air temperature exceeded 1°C.

Once the relevant parameters have been identified, mainly wind speed and LAD, an experimental analysis was conducted to test the results obtained by the model. For this purpose a large green roof was identified, able to represent the urban scale which is the object of the studio. The building identified for this purpose was the parking building of the Terminal 4 in the international Madrid airport. Even though this is not a standard urban area, the scale and configuration of the space around the building were deemed as acceptable for the analysis since the geometry, surface characteristics and usage could represent an urban street type area. The building is an 800x200 m, 15 m height parking building, surrounded by access paved paths and the terminal building. The parking is enclosed with facades that configure an urban canyon-like space, although the aspect ratio is lower than 0.5 and the wind patterns differ

slightly from the theoretical model run and present wind speeds inside the canyon closer to the reference wind speed at roof level.

The building features the largest green roof in Europe, a 12 Ha extensive green roof populated with a mix of herbs and sedum with a LAD of 1.5. The buildings are surrounded by planted areas at the sidewalk and trees shading the main building facades.

Green roof performance was evaluated by monitoring temperatures and relative humidity in the canyon in a typical summer day. The day selection was done taking into account meteorological predictions so the weather conditions on the measurement day were as close as possible as the optimal conditions identified in terms of green roof effects on the urban canyon. July 9<sup>th</sup> 2014 was selected for the measurement campaign because the predictions showed 1 m/s wind speed and sunny sky, which were very similar to the weather conditions where the effect of the green roof was most noticeable in the theory model.

Measurements were registered hourly from 9:00am to 19:00 on July 9<sup>th</sup> 2014. Temperature, relative humidity and wind speed were recorded at 5 different levels, at 1.5, 4.5, 7.5, 11.5 and 16 m above ground and at 0.5 m distance from the building façade. Measurements were taken in three different scenarios, sunny exposure, shaded exposure, and shaded exposure influenced by nearby trees and moist soil.

Temperature, relative humidity and wind speed were registered using a TESTO 410-2 anemometer, with 0.1°C resolution for temperature, 0.1 m/s resolution for wind speed and 0.1 % for relative humidity. Surface temperatures were registered using an infrared camera FLIR E4, with temperature resolution 0.15°C. Minimal distance to surface of 0.5 m and T<sup>a</sup> measurements range from -20°C and 250°C.

The temperature profiles measured on the site showed the influence of solar exposure on the temperature variations along the day, as well as the influence of the heat irradiated by the building surfaces which had been exposed to the sun radiation and those influenced by the moist soft areas around the building.

After the measurements were taken, the following simulations were conducted to evaluate the impact of the green roof on the microclimate:

- a. Standard roof: T4 building assuming a concrete tile roof with albedo 0.3.
- b. Green roof: T4 building assuming an extensive green roof with low LAD value (0.5)-Simple Sedum roof.
- c. Green roof: T4 building assuming an extensive green roof with high LAD value 1.5- Lucerne and grasses
- d. Green roof plus street level vegetation: T4 Building, LAD 1.5 (Lucerne), including the existing trees at street level. This scenario represents the current conditions of the building.

The urban canopy wind was set as 1 m/s, the wind speed register at that level during the measurement campaign. This wind speed remained constant over the whole campaign.

Under the above conditions, the results of the models show a moderate effect of green roofs on the surrounding microclimate ranging from 1°C to 2°C, but a larger contribution when combining it with vegetation at pedestrian level, where 4°C temperature reductions are reached. Relative humidity variations between the different scenarios did not exceed 1% in any case.

Measured temperatures and relative humidity were compared to model results, showing a close match in the profiles defined in both cases and the good capacity of ENVI met to capture the impact of the green roof in this analysis. The largest differences were registered in the areas close to the top areas of the facades which were more exposed to sun radiation and also near to the soil level. These differences might be caused by differences between the materials properties included in the model and those in the real building since the materials selection in the model is limited to those available in the software database.

An important observation derived from this study is the contribution of moist soil to the green roof effect on air temperatures. In the green roof scenario with surrounding trees, the effect of the moist soil contributes to raise the temperature reductions at 4.5°C.

A final analysis was conducted after extracting the hourly temperature profile in the street canyon influenced by the effect of green roofs and trees. An energy model was run on the building assuming it was a conventional enclosed building and changing the average typical year data for the simulation day by the temperature profiles extracted from the ENVI-met results. Design Builder software, based in Energy plus simulation engine, was selected for this analysis because its capacity for producing hourly simulations and its recognized accuracy in the field of energy modelling. For the 24h simulation based in the modified temperature profiles extracted for July 9<sup>th</sup>, energy demand reductions were calculated for the building reaching up to 14% reductions at the peak hour.

The main conclusion of this study is the potential of the green roofs as a strategy for reducing air temperatures and energy consumption in the buildings, although this effect can be limited by the influence of high speed winds and radiation from the surfaces confining the urban canyon. This cooling effect provided by the green roof is enhanced by combining the green roof with urban forests and even more if soft moist pavements are included in the urban canyon morphology, becoming a potential strategy for adapting urban ecosystems to the increasing temperature effect derived from climate change.

In relation to the software tool, ENVI-met has proven to be suitable for microclimate analysis, reproducing very closely the temperature and relative humidity profiles captured during the measurement campaign. It also generates wind profiles for the specific urban canyons typologies analyzed which are in accordance to previous works analyzing this aspect of urban canyons. Therefore, it is deemed as a good tool for the quantitative analysis of green elements effects in the urban context.



Further work should be developed to evaluate the effect of green roofs in different climate zones in order to get broader conclusions about their capacity to address temperature raise issues in other parts of the world. It would be also needed to get a better understanding of the interaction of additional parameters in the evaluation of the green roof impact, such as enclosing surfaces physical properties ( humidity or albedo), as well as the impact analysis on Mean Radiant temperature or human comfort indexes which have not been dealt with in this study. Also, further work on the impact of green systems in the relative humidity is needed, it would be interesting to evaluate further green strategies aimed to raise relative humidity in the urban canyon, since the configuration of the cases analyzed did not show any variation in this parameter and it would be beneficial for hot-dry climates.

## 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha pasado a ocupar la cabecera de la lista de los problemas mundiales en los últimos años. A pesar de ser continuamente minimizado durante décadas, sus efectos se han convertido en una realidad innegable que se está evidenciando en todo el mundo. El quinto Informe de evaluación elaborado por el Panel Internacional del Cambio Climático, el Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2014) confirma la tendencia de calentamiento de la atmósfera que se ha acentuado en los últimos años. Los datos reportados, muestran una alta probabilidad de que el período 1983-2012 haya sido el período de 30 años más cálido registrado en los últimos 800 años en lo referente a las temperaturas medias anuales en el hemisferio norte.

A raíz de éstas evidencias, diferentes organizaciones mundiales han desarrollado normativas, estrategias y objetivos orientados a encontrar soluciones que contribuyan en los dos frentes que el IPCC ha abierto para abordar este problema global, estrategias de adaptación y de mitigación al cambio climático (Kato & Yamaguchi, 2005) especialmente orientadas al ámbito urbano, que dada la concentración de población en éste tipo de ámbito, se configura como el área con mayor vulnerabilidad antes sus efectos.

La búsqueda de soluciones que ayuden a los agentes implicados en el desarrollo urbano a afrontar este problema ha llevado a la formulación de estrategias que plantean un cambio en el entendimiento de las ciudades, tratándolas como sistemas vivos que necesitan alcanzar un equilibrio con su entorno y dotándolas de herramientas para poder conseguir este fin. Una de estas herramientas se basa en la integración de los elementos vegetales en la trama urbana, no solo con un fin estético como se había hecho hasta ahora, si no como sistemas activos que dotan a la ciudad de los elementos necesarios para metabolizar y regular los agentes contaminantes y a mejorar su capacidad de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático.

Uno de los sistemas vegetales con mayor potencial de integración en las ciudades son las cubiertas ajardinadas, gracias a que se integran en la trama edificada, como un elemento

sinérgico entre el medio natural y el construido, proporcionando la función de cerramiento y a la vez, múltiples servicios al ecosistema por su carácter natural, entre ellos, la capacidad de regular las temperaturas y la humedad. Esta investigación intenta aportar un mayor nivel de conocimiento y comprensión de los mecanismos por los que las cubiertas ajardinadas modifican el microclima urbano en el ámbito de calle, especialmente en el nivel habitable, entre las cotas 0 y 2,5 m.

Las secciones siguientes, exponen en más detalle la problemática, el sistema propuesto como solución potencial y sus efectos sobre la ciudad.

### 1.1 EXPOSICIÓN DEL PROBLEMA

El entendimiento del efecto del cambio climático en las ciudades requiere un conocimiento, no sólo de los escenarios climáticos y las condiciones meteorológicas que van a marcar el día a día en el medio urbano en el futuro, sino también la comprensión y ponderación de cada uno de los agentes que lo conforman. La arquitectura, los materiales, las fuentes de calor, los factores antrópicos y la vegetación.

Con el fin de comprender mejor las interacciones de estos sistemas y evaluar el impacto del cambio climático sobre ellos, La Unión Europea está destinando fondos en los últimos años para promover el desarrollo de estudios que evalúen las consecuencias del cambio climático a escala local en las diferentes regiones Europeas así como objetivos y soluciones de adaptación y mitigación de sus efectos. Uno de estos proyectos fue el proyecto ENSEMBLES (Gutiérrez, et al., 2009), financiado dentro del Sexto Programa Marco. Este trabajo desarrolló modelos predictivos regionales para evaluar el impacto del cambio climático en España y definió los escenarios climáticos regionales proyectados para el territorio español. Estos escenarios estimaban una evolución de las variables climáticas en los municipios que se usaron por la Red Española de Ciudades por el Clima para identificar los cambios en el clima futuro Español, marcados por un descenso significativo en la precipitación media anual, un incremento de la temperatura media mínima diaria y un incremento de media mensual anual de las temperaturas máximas.

El calentamiento del aire y disminución de las precipitaciones que se predicen tiene un mayor impacto sobre los núcleos urbanos, en los que las características físicas del espacio construido marcadas por su impermeabilidad y su alta capacidad de almacenamiento térmico, añadidos a las fuentes antropogénicas de calor y emisiones, exacerban el problema del llamado “Efecto Isla de calor”, que ocurre como resultado del aumento del flujo de calor sensible desde la superficie de la tierra a la atmósfera en las ciudades y su entorno próximo, especialmente durante el periodo nocturno. Este fenómeno se ve continuamente incrementado por la sustitución masiva de áreas de vegetación por edificios y superficies impermeables (Kato & Yamaguchi, 2005) que absorben el calor durante el día y lo devuelven en forma de radiación infrarroja durante la noche sin permitir el enfriamiento nocturno que regula térmicamente el ecosistema urbano. Este efecto impacta severamente no sólo el confort térmico de los habitantes de las ciudades, sino también en la demanda de electricidad para refrigeración en los edificios que se ve incrementada (Santamouris M. , 2001).

Los edificios son responsables del 40% del consumo energético en los países desarrollados y en consecuencia, del 40% de las emisiones de carbono (Junnla & Horvath, 2003), estas cifras se ven aumentadas a causa de la contribución cada vez mayor del sector inmobiliario que tiene una mayor demanda de refrigeración para mantener el confort térmico en este escenario de calentamiento, de ahí el interés de este tipo de ámbito para esta investigación.

## 1.2 OBJETO: EL ENTORNO URBANO

La problemática expuesta en la sección previa se ve magnificada por pronósticos de crecimiento urbano que indican que la población urbana representará más del 50% de la población mundial en la primera mitad del siglo XXI, con un incremento de alrededor de 1,5 millones kilómetros cuadrados de nuevo suelo urbano en 2030 (triplicando el área global de la tierra urbana en el año 2000 (Yeang, 1999). Este crecimiento resulta en un aumento de la densidad urbana y las infraestructuras que ocupan cada metro cuadrado de suelo disponible en las ciudades. Como resultado, los espacios verdes y el suelo cultivable están transformándose progresivamente en infraestructuras y edificios, menguando la proporción de espacios

naturales y alterando el equilibrio del ecosistema que ve progresivamente limitados los mecanismos naturales que garantizan su regeneración natural (Yeang, 1999).

La erosión del suelo, la desecación de los acuíferos, el agotamiento de los recursos materiales y fósiles, las islas de calor, la contaminación de la escorrentía de agua de lluvia, la pérdida de biodiversidad, el incremento de emisiones a la atmósfera y el deterioro de la calidad del aire y agua, son algunas de las consecuencias de esta transformación que tiene efectos letales para los ecosistemas cercanos a los núcleos urbanos, y que perjudican no solo a la salud sino también la economía de los mismos (Yeang, 1999).

En los climas templados como el Mediterráneo, el efecto de las olas de calor, la sequía, y las lluvias torrenciales, tienen un impacto muy importante, especialmente en los periodos de verano, afectando las condiciones de habitabilidad de las ciudades y la salud de sus ocupantes. Por esta razón, tanto los nuevos desarrollos urbanos como las actuaciones de rehabilitación urbana están llamados a incorporar mecanismos capaces de mantener las condiciones de confort y seguridad por medio de la recuperación del equilibrio con su entorno natural.

Este fenómeno ha despertado la preocupación de los agentes involucrados en el desarrollo urbano por comprender las consecuencias del cambio climático en las ciudades. Tanto para identificar las estrategias y cambios necesarios en la trama urbana que posibiliten la mitigación de sus efectos, como los mecanismos de adaptación que permitan fortalecer la capacidad de las ciudades para resistir y mantener su funcionalidad en el escenario del cambio climático. Tanto arquitectos como urbanistas encaran la difícil tarea de desarrollar edificios y ciudades capaces de acomodar este crecimiento demográfico, adaptarse a un clima cambiante y a la vez, evitar la destrucción de los espacios verdes y la sobreexplotación de los recursos naturales.

El caso de la ciudad de Madrid en España, es un ejemplo relevante de la evidencia de los efectos del cambio climático. La Agencia Estatal de Meteorología de España (AEMET) ha participado en el proyecto europeo mencionado previamente, ENSEMBLES (Ensemble-based Predictions of Climate Change and their Impacts), integrado en el VI Programa Marco de la Unión Europea (Gutiérrez, et al., 2009).

Los análisis realizados en el marco de este programa cuyo objetivo es el estudio de la evolución de las diferentes variables climáticas en el ámbito de la Comunidad de Madrid pronostican la evolución a lo largo del periodo 2020-2100 de las variables del clima y anuncian los siguientes cambios:

- a. un incremento sostenido en la duración de los episodios denominados como olas de calor, con datos que muestran un incremento de un 20% en el número de días cálidos en el 2050 respecto al periodo de referencia,
- b. una reducción progresiva del número de días que registran episodios de heladas que para el año 2050 podrían verse reducidos en una media del 20% y,
- c. un incremento continuado en la duración de periodos sin lluvia de entre 5 y 10 días para el año 2050.

Una de las respuestas arquitectónicas a este problema, es el urbanismo adaptado al clima o bioclimático, que en sí es una filosofía de diseño que tiene como principio la conservación del medio ambiente. Esta práctica se define como una ciencia interdisciplinaria que estudia de un modo holístico el proceso de diseño y desarrollo urbano con el fin de conseguir un modelo sostenible en sus tres componentes, social, medioambiental y social (Yeang, 1999).

Los principios detrás de esta práctica se basan en la Ecología y la sostenibilidad, definidos como “la rama de la ciencia que estudia la distribución y abundancia de los organismos vivos, sus hábitats y su interacción con su medio” (Haeckel, 1869), y “el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones de satisfacer sus necesidades en el futuro” (Bruntland, 1987) respectivamente. De acuerdo con estas definiciones, el diseño ecológico tiene en consideración la interacción del edificio con su medio natural circundante, así como las consecuencias de su impacto durante su vida útil teniendo en cuenta esta interacción desde los primeros estadios del proceso de diseño. Así, el “diseño ecológico” se centra no solo en reducir el consumo de energías no renovables, y materiales, sino que aborda muchos otros temas medioambientales como la reducción de la destrucción de espacios verdes, así como la reducción de las emisiones, los residuos industriales y urbanos y las aguas residuales. Aún más, esta forma de diseño tiene como

objetivo restaurar los ecosistemas tras el daño causado y transformar el impacto del edificio durante su vida útil en un impacto positivo y regenerador. El proyecto ecológico debe tener una acción reparadora sobre el medio ambiente (Zeihner, 1996),

El resultado de esta filosofía es un diseño comprometido con el medio ambiente, arraigado en el clima local, que usa técnicas pasivas para proporcionar iluminación, ventilación, calefacción y refrigeración, que incluye espacios verdes como parte del diseño teniendo en cuenta su funcionalidad, como elementos con la capacidad de reciclar agua y desechos y limpiar el aire. En consecuencia, es un diseño que consigue un urbanismo más vivible.

Un ejemplo de esta tendencia lo encontramos en las recomendaciones de diseño urbano para la ciudad de Florencia (Sala, 1998). Este documento enumera distintas técnicas para mejorar la funcionalidad urbana y poner en relieve consideraciones para el diseño de los edificios tales como la orientación, la radiación solar, el estudio e integración de los patrones de viento y la topografía y vegetación de la región como elementos fundamentales en el diseño urbano con el fin de lograr un diseño vivible y colateralmente más eficiente energéticamente.

Este trabajo se centra específicamente en una de estas estrategias, la inclusión de la vegetación local como componente del diseño y su aspecto funcional dentro del sistema urbano.

### 1.3 ESTRATEGIAS DE NATURALIZACIÓN

Entre las distintas estrategias de diseño bioclimático enumeradas, la incorporación de espacios y elementos vegetales en los edificios y en el diseño urbano es una de las más antiguas y a su vez interesantes para arquitectos y urbanistas, ya que materializa la interrelación entre el edificio y el ecosistema circundante (Yeang, 1999).

Los sistemas “verdes” pueden entenderse como un mecanismo activo de control del microclima alrededor del edificio en áreas urbanas y paralelamente una estrategia eficaz para recuperar las áreas verdes arrebatadas al medio natural (Wong, et al., 2002).

El concepto de Arquitectura Ecológica o Bioclimática apareció en la escena arquitectónica como respuesta al creciente deterioro medioambiental y al aumento de los precios del petróleo en los años 70. Inicialmente se centró en la reducción del consumo energético en los edificios por medio del perfeccionamiento de los sistemas mecánicos de ventilación, calefacción y aire acondicionado y a la mejora de los sistemas de iluminación, pero también por medio de la integración de vegetación en los edificios como una herramienta para controlar el microclima dentro del edificio y los espacios urbanos recuperando así una tradición de diseño de cientos de años atrás que se perdió con la llegada de los sistemas mecánicos de calefacción y aire acondicionado a principios del siglo XX por la que los arquitectos dejaron atrás la interdependencia de los edificios con su medio circundante creando una arquitectura totalmente desvinculada de su ubicación y medio.

A pesar de que los años 30 Frank Lloyd Wright y Le Corbusier comenzaran de nuevo a introducir la vegetación en edificios como parte de su búsqueda de nuevas tendencias estética, no fue hasta la crisis energética cuando se integró la vegetación con una función que excedía la mera integración del edificio con el paisaje circundante, sino que también tenía en cuenta mecanismos por los cuales la vegetación podía mejorar el microclima urbano y reducir el consumo de energía en los edificios.

Hoy en día, el concepto de arquitectura ecológica ha ampliado su alcance y su objetivo es conseguir que la solución dote al diseño de una mejor funcionalidad adaptada a los escenarios futuros, tanto de clima como de población y uso. Las estrategias basadas en la inclusión de elementos de vegetación en los espacios urbanos se han convertido en una tendencia y levantan gran interés a nivel de académico y estratégico. Esto es mayormente debido a su potencial no sólo para mitigar el efecto isla de calor, pero también de restaurar el ecosistema y mejorar la estética de las zonas urbanas (Oberndorfer, et al., 2007).

El informe “Cities Alive” (Arup, 2014) plantea la cuestión de cómo la integración de la naturaleza puede ayudar restaurar la armonía en las ciudades. Con un futuro incierto en el que las nuevas tecnologías marcarán las intervenciones a todos los niveles, surge la necesidad de repensar la infraestructura urbana para conseguir reconstruir el vínculo con la naturaleza y



crear el “ecosistema de ciudad” que incluya parques y espacios abiertos, árboles urbanos, calles, plazas, bosques y cursos de agua como estrategias activas para crear ciudades más sanas, más seguras y más prósperas. Para realizar esta visión, infraestructura verde cobra un papel más influyente en la planificación y diseño de ciudades y entornos urbanos.

Este informe, plantea además la necesidad de que la re-naturalización de las ciudades sea parte integra del concepto urbano como estrategia de mejora de la interacción social y la salud por su carácter multifuncional, que tiene la capacidad de mejorar el funcionamiento y la resiliencia global de los desarrollos en los que se integra. Para lograr este reconocimiento es necesario reinterpretar la naturalización a la luz de las nuevas tecnologías y herramientas que capacitan al diseñador para cuantificar el efecto de las estrategias planteadas, con el fin de optimizar el diseño y responder a las demandas actuales y futuras. Esta concepción del paisajismo como parte de un diseño integrado se clave para que sus beneficios en el corto y largo plazo se reconozcan y se desarrollen políticas que favorezcan la implementación de estas estrategias.

De igual modo, el informe “Green infrastructure: an integrated approach to land use” (Landscape-Institute, 2013) reafirma el papel que la infraestructura verde puede desarrollar a la hora de afrontar los retos que se presentan a las ciudades en este siglo. Este informe aboga la naturaleza como un proveedor de servicios, que ha demostrado ser en muchas ocasiones más efectivo en término de costes, más resistente, versátil y capaz de satisfacer las necesidades sociales, medioambientales y económicas, que las soluciones construidas.

Entre las múltiples posibilidades arquitectónicas que ofrece esta estrategia de naturalización, una de las zonas con mayor potencial de mejora son los techos. (Frazer, 2005), que juegan un papel muy importante en la regulación del flujo de calor a través de edificios. La cubierta ajardinada se define como una cubierta con plantas en su superficie. Esta estrategia recupera el terreno natural ocupado al construir el edificio y se lo devuelve indirectamente a la naturaleza, restaurando su capacidad de filtrar el agua contaminada de lluvia, devolviendo la capacidad de control climático a las superficies y regenerando el ecosistema y mejorando la coexistencia del edificio y el medio natural circundante. En resumen, reduciendo los efectos perjudiciales de la urbanización sobre los ecosistemas locales. El siguiente capítulo describe

en profundidad los servicios proporcionados al ecosistema por las cubiertas vegetales a diferentes escalas, tanto a escala de ciudad como en la de edificio y el entorno del cañón urbano al que influyen, definido por el ámbito confinado por los edificios en una calle.

## 2. CUBIERTAS AJARDINADAS: SERVICIOS DADOS AL ECOSISTEMA

Los beneficios resultantes de la inclusión de vegetación en el medio urbano mediante la instalación de cubiertas ajardinadas han sido ampliamente estudiados, en palabras de Wong, “Las cubiertas ajardinadas constituyen una solución ecológica a la jungla de hormigón de las ciudades” (Wong, et al., 2002). Además de ser estéticamente atractivas proporcionan múltiples servicios al ecosistema que se traducen en beneficios que van desde la escala del edificio en el que se instalan hasta la macroescala de la ciudad. Estos servicios se analizan en las siguientes secciones.

### Reducción del efecto de isla de calor

El efecto de isla de calor (*heat island*) se define como la diferencia de temperatura existente entre los núcleos urbanos y las áreas naturales circundantes (Oke T. , 1982). Esta diferencia de temperatura llega a ser de hasta 4°C (Federer, 1970), (Santamouris M. , 2007) y se debe al calor almacenado por las superficies en núcleos urbanos y que se reemite al aire produciendo su calentamiento. La figura siguiente ilustra este fenómeno.

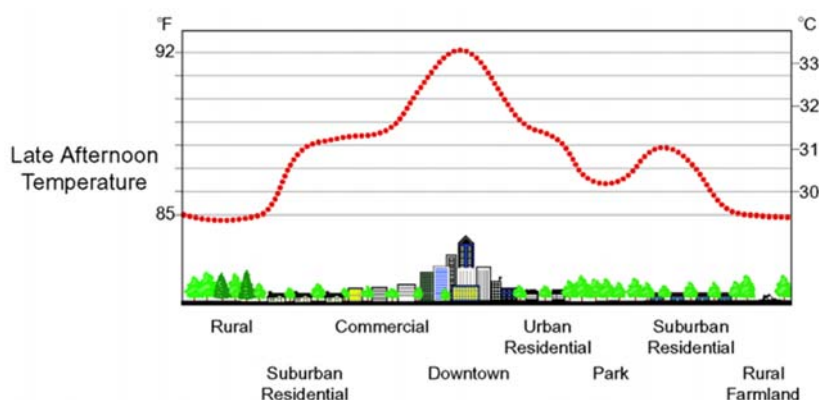


Figura 1 Perfil típico del fenómeno de isla de calor. Fuente: (Akbari H. , 2010).

Existen numerosos factores que contribuyen a este fenómeno. Por ejemplo, la gran proporción de áreas con superficies impermeables y oscuras con gran capacidad para absorber la radiación solar, así como el bloqueo de los pasos de viento con los edificios y el calor liberado por los sistemas de aire acondicionado y los automóviles. De la Flor y Domínguez analizaron la influencia de las superficies asfaltadas sobre el efecto isla de calor usando el modelo de cañón urbano. Éstos

determinaron que las superficies “duras” absorben más la radiación solar aumentando por lo tanto su temperatura. Este incremento puede alcanzar hasta 35°C más que la temperatura del aire circundante lo que provoca que el calor se irradia al aire por el diferencial de temperatura. En consecuencia, el calor re-radiado por estas superficies al aire hace que la temperatura ambiente también aumente (Flor & Domínguez, 2004).

Éste aumento de la temperatura en las ciudades se ha convertido en uno de los principales problemas medioambientales en núcleos urbanos por varias razones, en primer lugar porque aumenta el consumo de aire acondicionado en los periodos cálidos, incrementando por lo tanto los impactos derivados del consumo de energía eléctrica y sus emisiones asociadas. En segundo lugar aumenta la inestabilidad atmosférica, provocando tormentas locales y cambiando el microclima del lugar, lo que afecta al ecosistema local. En tercer lugar, disminuye la calidad del aire y facilita el aumento de partículas en suspensión, puesto que el aire se vuelve menos denso y aumenta su velocidad de ascenso hasta en 0,5 m/s sobre las superficies asfaltadas (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999). Esto crea una columna vertical de aire en movimiento que eleva partículas de polvo desde el suelo enturbiando el aire y empeorando su calidad. Aún más, cuanto mayor es la temperatura del aire, mayor es la velocidad a la que las reacciones químicas que dan lugar al ozono tienen lugar y por lo tanto mayor es la frecuencia de días con baja calidad de aire.

El efecto de isla de calor ha sido observado en numerosas ciudades desde principios del 1900s, y entre otros factores se atribuye a la falta de suficiente vegetación en éstos núcleos. Los mecanismos mediante los cuales la vegetación puede reducir la temperatura ambiente han sido ampliamente estudiados siendo su principal efecto el sombreado que proporcionan sobre las superficies asfaltadas, reduciendo la radiación incidente y su temperatura superficial y por tanto, disminuyendo la cantidad de calor que radian de vuelta a la atmósfera (Scholz-Barth, 2004). Así mismo, las plantas atrapan el CO<sub>2</sub> y las partículas en suspensión que de otro modo absorberían el calor re-radiado por las superficies duras y lo volverían a emitir al aire en un proceso que incrementa aún más la temperatura del aire alrededor de los edificios.

Para demostrar como la presencia de vegetación sobre las superficies puede aminorar este efecto, Wong y otros autores analizaron en 2002 la temperatura del aire a distintas alturas sobre la superficie de la cubierta de un edificio en dos casos; con una cubierta plana no protegida común, y con una cubierta ajardinada en Singapur. Cuando compararon las temperaturas medidas sobre la cubierta ajardinada con las medidas sobre la cubierta convencional, la temperatura en la zona inmediatamente sobre la cubierta (entre 0,3 y 1,2 m) llegaba a ser hasta 6°C menor en el caso del edificio con la cubierta ajardinada (Wong, et al., 2002).

El efecto de la cubierta ajardinada no se limita al edificio, puesto que debido a la reducción del perfil de temperaturas alrededor del edificio, se disminuyen también las ganancias de calor por transmisión por los cerramientos de los edificios adyacentes y considerando este efecto a gran escala, se podría cambiar el microclima general de una ciudad. Se considera que si tan solo un 5% del total de cubiertas de una ciudad fuesen ajardinadas, el ambiente podría mejorar su calidad sustancialmente (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999).

---

#### Reducción del consumo energético

En este ámbito se han realizado numerosas investigaciones para evaluar los beneficios de las cubiertas ajardinadas a escala de edificio. Las cubiertas ajardinadas han demostrado reducir la energía consumida en los edificios, principalmente en el verano, gracias a la reducción de la temperatura superficial de la cubierta y por tanto a la reducción del flujo de calor a través de la misma.

El sombreado, la refrigeración evaporativa y la energía consumida en los procesos fotosintéticos de las plantas, son los principales medios por los cuales las plantas regulan la temperatura superficial de la cubierta y colateralmente el microclima alrededor del edificio puesto que la reducción de la temperatura de la cubierta reduce a su vez la radiación de onda larga emitida al aire circundante por el edificio, contribuyendo de este modo a reducir el efecto de isla de calor en las ciudades colaborando así a crear un microclima adaptado con mejores condiciones de confort. Este efecto de enfriamiento ayuda a reducir la energía necesaria para el acondicionamiento interior

de los edificios (Del Barrio, 1998), no sólo por la reducción de las temperaturas exteriores, sino porque la vegetación y sustratos de cultivo de plantas además interceptan y disipan la radiación solar aumentando el sombreado de la cubierta, su inercia térmica y su nivel de aislamiento (en condiciones de sustrato seco) colaborando a una reducción en el consumo energético. Estas reducciones energéticas pueden llegar al 6% del consumo pico de refrigeración en verano en un clima como el de Madrid en relación a edificios con propiedades térmicas semejantes (Saiz, Kennedy, Bass, & Pressnail, 2006).

Su contribución a la reducción del consumo energético se ha monitorizado en varios estudios, haciendo un seguimiento de las temperaturas superficiales de la cubierta ajardinada con el fin de determinar sus propiedades térmicas y cuantificar el ahorro energético derivado de su instalación, (Susca, 2011), (Santamouris M. , 2014). (Niachou, K.Papakonstantinou., Santamouris, Tsangrassoulis, & Mihalakakou, 2001). Estos autores analizaron diferentes tipos de cubiertas ajardinadas, con diferentes niveles de aislamiento, encontrando que las reducciones en la energía consumida en climatización alcanzaban valores comprendidos entre el 40% al compararse con cubiertas sin aislamiento y el 2% para cubiertas bien aisladas. A pesar de que la conclusión de este estudio fue que las cubiertas ajardinadas no tienen capacidad de refrigeración por sí mismas hay estudios como los de Palomo del Barrio que confirman el aumento de la capacidad aislante de la capa vegetal en las cubiertas ajardinadas (Del Barrio, 1998).

En otra línea, Eumorfopoulou y Aravantinos, condujeron varios experimentos en clima Mediterráneo comparando cubiertas vegetales aisladas y no aisladas, llegando a la conclusión de que las cubiertas ajardinadas complementaban la capacidad aislante de una cubierta plana común pero que por sí mismas no proporcionan suficiente aislamiento para proveer confort térmico dentro de un edificio (Eumorfopoulou & D.Aravantinos., 1998).

Wong y otros autores analizaron en 2002 los efectos de diferentes tipos de cubiertas ajardinadas en un edificio comercial de cinco plantas en Singapur. En este estudio se comparaba el comportamiento térmico de la cubierta con diferentes tipos de vegetación (ej., arbustos, árboles, césped) y diferentes espesores de sustrato. Los autores llegaron a la conclusión de que el ahorro

energético obtenido alcanzaba el 15% en comparación con el edificio con una cubierta plana convencional. Este valor correspondía a una cubierta intensiva compuesta por 300 mm de sustrato arcilloso y arbustos con un contenido de humedad en el sustrato del 40% y siendo el porcentaje cubierta / cerramiento vertical de 0,2 ( $\text{m}^2$  cubierta /  $\text{m}^2$  cerramiento vertical) (Wong, et al., 2002).

El grado en el que los edificios se benefician de las propiedades de las cubiertas ajardinadas, depende de varios factores tales como la orientación, el clima, los materiales, el radio cubierta-superficie vertical, el porcentaje de superficie acristalada en el edificio y las fuentes de energía usadas para proveer calefacción y aire acondicionado. Las reducciones en calefacción se atribuyen a una disminución en las pérdidas de calor por convección, ya que la velocidad del viento sobre la fachada es menor cuando hay vegetación en la superficie o en el perímetro de la superficie, las reducciones en consumo energético en este caso son difíciles de cuantificar y los resultados no son relevantes. Sin embargo, en el caso del aire acondicionado, el ahorro energético es más significativo. Varios estudios energéticos han demostrado que se consiguen hasta 2°C reducción de la temperatura interior y reducciones en la temperatura del aire alrededor del edificio de hasta 3 K. (Santamouris M. , 2014) que se traducen en una reducción de la demanda de refrigeración en un edificio del 6%, (Jaffal, Salah-Eddin, & Belarbi, 2012) coincidentes con otros estudios ya mencionados como (Saiz, Kennedy, Bass, & Pressnail, 2006).

Los estudios coinciden en el potencial de las cubiertas ajardinadas para mejorar el comportamiento energético de los edificios y en especial, lo atribuyen al sombreado. Simpson & McPherson analizaron el efecto que un árbol con una vida de unos 40 años podría tener sobre la emisiones derivadas del consumo energético de un edificio gracias al sombreado producido en su fachada. Los resultados cuantificaron una reducción de emisiones de 7,4 toneladas de CO<sub>2</sub> (Simpson & McPherson., 2000).

---

#### Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero

El impacto sobre el comportamiento energético del edificio se puede entender también como su capacidad para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las zonas urbanas se

consideran como una de las mayores fuentes de aportación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) debido principalmente a la energía consumida por los sistemas de climatización. La capacidad de las cubiertas ajardinadas para reducir este consumo energético, se traduce en una reducción directa de la cantidad de emisiones derivadas de este consumo. Varios estudios han evaluado el efecto de la vegetación sobre las emisiones de GEI, como Simpson y McPherson, que analizaron las reducciones en emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de la energía consumida por sistemas de calefacción y aire acondicionado en edificios de viviendas en Tucson, Arizona, y comprobaron que estas emisiones se vieron reducidas sustancialmente por el efecto de la vegetación instalada sobre las superficies de los edificios (Simpson & McPherson., 2000).

Aparte de la reducción de emisiones derivadas del consumo energético, las plantas absorben gran cantidad del CO<sub>2</sub> que de otro modo estaría presente en el aire. Varios estudios han cuantificado la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede ser absorbido por las plantas, como Simpson y McPherson en su estudio acerca de la transformación natural del CO<sub>2</sub> en biomasa por medio del proceso de fotosíntesis. Los autores determinaron la cantidad de CO<sub>2</sub> que puede ser absorbida por los árboles teniendo en consideración el balance entre las cantidades de CO<sub>2</sub> absorbidas durante la vida del árbol y las liberadas al aire una vez que el árbol muere y se descompone. En este estudio, la cantidad de CO<sub>2</sub> capturado se estimó en 3,9 ton de CO<sub>2</sub> por árbol, considerando una vida de árbol de 40 años (Simpson & McPherson., 2000). En un estudio similar Rich, calculó la capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> por las plantas con el fin de determinar la cantidad de emisiones producidas por el hombre que la hidrosfera es capaz de absorber equilibradamente y la cantidad que queda acumulada en la atmósfera. El autor determinó que los árboles tienen una capacidad de acumulación de 1 ton CO<sub>2</sub>/acre/año (Rich, 1970).

En el caso de las cubiertas ajardinadas, se ha documentado una capacidad de captación de hasta 162 g CO<sub>2</sub>/ m<sup>2</sup> de cubierta ajardinada (Getter, Rowe, Robertson, Cregg, & Andresen., 2009).

---

#### Mejora de la calidad del aire



Otro de los efectos beneficiosos que aporta la existencia de vegetación en el medio urbano es la mejora de la calidad del aire que respiramos. La vegetación hace que existan menos partículas en suspensión, siendo estas capturadas por las hojas de los árboles y plantas. Ésta captación tiene lugar primeramente de una forma mecánica. Las partículas de polvo chocan con las hojas de la vegetación quedando las más pequeñas pegadas en el limbo, mientras que las mayores se depositan gracias a su masa. Esta capacidad de fijación se refuerza por la acción del rocío, que mejora la adherencia, y por la capacidad de los estomas de las hojas de las plantas para fijar y sostener partículas de polvo y aceite.

Un segundo sistema de fijación se produce por efectos electrostáticos, a causa de los cuales las partículas finas y las pequeñas gotitas de escaso peso que se encuentran en su mayor parte electrizadas. Estas partículas son atraídas por la superficie foliar cargada con signo contrario.

Esto se debe a la evapotranspiración, que crea un campo electrostático configurándose las hojas como un polo de atracción de dichas partículas y también para captar micro organismos dotando a la planta de una capacidad antiséptica. Esta acción se lleva a cabo por un proceso similar al descrito anteriormente para las partículas de polvo y se complementa con la producción, por parte de la superficie foliar, de ozono ( $O_3$ ), gas de alto poder bactericida, lo que elimina gran parte de los microorganismos nocivos contenidos en el aire (Ochoa J. M., 1999).

Aparte de esta capacidad de fijación de partículas por parte de las hojas, las hojas en sí actúan como filtros de aire absorbiendo y transformando las partículas en suspensión durante el proceso de la fotosíntesis. En esta línea, Peck y otros, concluyeron que la capacidad filtrante media de las hojas de distintas especies presenta un valor medio de unos 0,2 Kg. /m<sup>2</sup> (de superficie de hoja) cada año. Los autores comprobaron que las áreas urbanas sin vegetación presentan valores de partículas contaminantes en suspensión un 85% mayor que aquellas que tienen vegetación (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999).

La reducción de partículas en suspensión representa no sólo un gran beneficio para la salud humana, reduciendo el gasto público en el sistema sanitario, sino que además reduce el deterioro provocado

por estos compuestos en suspensión sobre las fachadas de edificios y demás elementos urbanos lo que revierte en la reducción de sus costes de mantenimiento y limpieza a largo plazo.

Las plantas, además de capturar partículas en suspensión, producen oxígeno durante la fotosíntesis. Las plantas convierten  $\text{CO}_2$ , agua y radiación solar en  $\text{O}_2$  y glucosa. Esta transformación tiene lugar en las hojas verdes, por tanto, la cantidad de oxígeno producido es proporcional a la superficie de hoja de cada tipo de planta. En general se puede considerar que  $25 \text{ m}^2$  de superficie de hoja produce 27g de Oxígeno durante el día (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999) . Si tenemos en cuenta que las plantas solo producen oxígeno durante el día y el oxígeno que se consume en los procesos de descomposición de las planta muertas, la superficie de hoja que se necesita para proveer todo el oxígeno que necesita una persona por año es de  $150 \text{ m}^2$  (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999). Por tanto, asumiendo que  $1 \text{ m}^2$  de césped sin cortar tiene una superficie de hoja de  $100 \text{ m}^2$ ,  $1,5 \text{ m}^2$  de cubierta ajardinada sería suficiente para proveer suficiente oxígeno para un hombre durante un año de su vida (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999).

Todos los mecanismos expuestos anteriormente, dependen de la superficie foliar que tiene la vegetación, dicho parámetro se determina a través del Índice de Área Foliar (IAF) o Leaf Area Index (LAI) definido como el área de hojas por unidad de volumen. Por ejemplo, un césped de 10 cm de altura contiene por cada metro cuadrado cubierto una superficie verde de  $20 \text{ m}^2$  o una haya de 25 m de altura tiene  $10 \text{ m}^2$  de superficie foliar por cada  $\text{m}^2$  de suelo que cubre. Este valor debe multiplicarse por 100 para obtener la superficie interna asimiladora, lo que equivale a  $1000 \text{ m}^2$  por cada  $\text{m}^2$  de suelo cubierto. (Ochoa J. M., 1999).

---

### Control de ruido aéreo

La vegetación alrededor del edificio reduce la velocidad del aire, que es el principal factor en la transmisión del ruido. Este efecto no está estudiado en profundidad y sólo existen algunas

mediciones sistemáticas que cuantifican la influencia de la vegetación en la atenuación del sonido aunque la información reportada no es consistente.

Se han realizado investigaciones que prueban que la capacidad de absorción acústica de algunas especies vegetales, varía con el tamaño de las hojas y la densidad del follaje, (Alessandro, Barbera, & Silvestrini, 1987), (Stryjenski, 1968), reportando una disminución para frecuencias superiores a 2000 Hz, con valores de atenuación de 1 dB cada 10 m de profundidad, hasta un máximo de 10 dB a 100 m o más.

A su vez, la vegetación puede tener un efecto refractario y atenuador de las ondas de ruido, en lugar de reflejarlo. En el caso de la cubierta ajardinada, la capa porosa que se forma entre el sustrato y la capa vegetal, atrapa las ondas sonoras y se convierte en un aislamiento acústico que puede aminorar el sonido mejorando así el comportamiento acústico urbano frente al ruido aéreo (Dunnett & Kingsbury, 2004) e incrementando la capacidad de absorción gracias al sustrato vegetal poroso. Algunos estudios reportan reducciones de hasta en 4 dbA el ruido aéreo (Yang, Yub, & Gongc, 2008), (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999), (Cook & Vanhaverbeke, 1977).

---

#### Control de escorrentía de agua de lluvia

Las cubiertas ajardinadas tienen el potencial de controlar la escorrentía de agua de tormentas dada su capacidad de absorción y retención. Scholz-Barth, en un estudio desarrollado en USA, indica que el agua de lluvia, siguiendo su ciclo en áreas naturales es absorbida por el suelo y la vegetación de acuerdo con el siguiente porcentaje: 30% del agua llega a los acuíferos superficiales y los recarga, otro 30% llega a los acuíferos profundos y aproximadamente un 40% vuelve a la atmósfera a través de procesos de evapo-transpiración (Scholz-Barth, 2004). En áreas urbanas donde el 75-100 % del suelo esta pavimentado o cubierto con edificios, una pequeña parte del agua de lluvia llega a infiltrarse. (Peck, C.Callaghan, Khun, & Brass, 1999), pero el balance global está descompensado, yendo la mayor parte del porcentaje de agua a la red de saneamiento.

Las cubiertas ajardinadas se presentan como una posible solución a este problema, ya que con ellas se recupera el terreno permeable perdido en el suelo cuando se construye el edificio. Se estima que la capacidad de retención de agua de las cubiertas ajardinadas extensivas varía entre un 50% y un 75% dependiendo del espesor y tipo de sustrato, (Peck, C. Callaghan, Khun, & Brass, 1999); (Scholz-Barth, 2004). Por ejemplo, 2,5 cm. de musgo y sedum, plantado sobre una capa de 7,5 cm. de terreno granular, puede retener un 58% del agua de lluvia, mientras que 10 cm. de hierba sobre un sustrato arcilloso puede retener un 71% (Scholz-Barth, 2004).

Una vez que el agua es retenida en el sustrato de la cubierta vegetal, se filtrará despacio e irá a la capa de drenaje y a los puntos de recogida de la red de saneamiento del edificio, que la descarga al sistema de saneamiento general, pero con un desfase temporal respecto al momento pico de la lluvia. Las cubiertas ajardinadas así, regulan los flujos de aguas pluviales reduciendo picos de descarga a la red de saneamiento durante la tormenta por medio del almacenamiento de la escorrentía en el sustrato vegetal (Mentens, 2006), (VanWoert, Rowe, Andresen, Rugh, & R. T., 2005) logrando reducciones de hasta el 78% de la escorrentía pico (Volder & Dvorak, 2014) a la vez que filtrando y reteniendo hasta el 95% del plomo y cobre de su contenido, (Peck, C. Callaghan, Khun, & Brass, 1999).

---

#### Cubiertas ajardinadas impacto psicológico y mejora de la biodiversidad

Otro beneficio no cuantificado que proporcionan las cubiertas ajardinadas se refiere a su impacto sobre el bienestar psicológico de las personas que las disfrutan. Muchos estudios han demostrado que la urbanización está asociada a un aumento de las enfermedades mentales. Estos estudios analizan los vínculos entre la menor exposición y disfrute de espacios naturales de la población y el aumento de enfermedades de tipo mental, incluyendo patrones de pensamiento autorreferencial que se asocia con mayor riesgo para la depresión y otras enfermedades mentales y muestran que la calidad de vida puede ser mejorada por la integración de espacios verdes naturales en las ciudades (White, Alcock, Wheeler, & Depledge, 2013), (Bratmana, Hamilton, Hahnc, Dailyd, & Grosse, 2015), (Cohen-Cline, Turkheimer, & Duncan, 2015) (Johnston & Newton., 1996 ). Los

efectos terapéuticos de las plantas y la naturaleza incluyen la reducción del estrés, disminución de la presión arterial, alivio de la tensión muscular y aumento de sentimientos positivos.

El uso de cubiertas vegetales y exposición al medio natural usado como terapia se ha puesto en práctica extensivamente en varios hospitales de Pennsylvania con resultados que demuestran la influencia de la vista y el contacto con vegetación en los tiempos de recuperación tras operaciones quirúrgicas. Este efecto beneficioso se atribuye también a la capacidad de las plantas para aportar extra oxígeno y capturar contaminantes (Ulrich, View from a Window May Influence Recovery from Surgery, 1984).

Este autor ha realizado experiencias en este campo, dándole a las funciones psicológicas de la vegetación un carácter científico. Uno de los experimentos consistía en observar la reacción de personal a la visión de diapositivas con diferentes paisajes rurales y urbanos. A partir de este experimento encontró que las escenas rurales despertaban más interés que las urbanas, además de despertar una actitud positiva en el observador.

Ulrich también registró las ondas cerebrales alfa de cada sujeto durante la proyección observando que la amplitud de las ondas alfa eran mayores cuando los sujetos veían paisajes rurales, que cuando veían los urbanos. Tanto los registros psíquicos como físicos mostraron que los sujetos se recuperaban más rápidamente y mejor cuando observaban los paisajes naturales (Ulrich, 198).

Una de las manifestaciones sociales y terapéuticas de las cubiertas verdes se ha producido en forma de huertos urbanos en los que se crean nuevas oportunidades de empleo para los habitantes de la ciudad y se favorece la integración social y el sentido de pertenencia a los barrios, aparte de los beneficios medioambientales de la producción local, como un aumento de la seguridad alimentaria y la reducción de la distancia de transporte de alimentos y refrigeración, con la consecuente reducción de impacto asociado.

---

## Mejora de la biodiversidad

En cuanto a su capacidad para mejorar la biodiversidad, hay que recalcar que la vegetación es necesaria para la supervivencia de muchos animales dentro de la ciudad. Una oportuna selección de las especies que constituirán los espacios verdes, podrían garantizar fuentes de alimento, vivienda y descanso a muchos animales. Por ejemplo la presencia de diversos invertebrados atraídos por las flores, constituyen un eslabón importante de la cadena alimenticia, pasando por numerosas aves insectívoras, hasta los depredadores más grandes. Está demostrado que cuanto más complejo y diversificado sea el conjunto vegetal, más amplia será la cantidad de especies que habiten un espacio verde. Generalmente la selección de especies nativas, más que las exóticas, contribuyen a determinar un hábitat más idóneo para las especies animales endémicas de la zona. (Ochoa J. M., 1999).

---

### Impacto sobre la huella ecológica

El impacto combinado de las cubiertas ajardinadas sobre las ciudades tiene como resultado una reducción de la huella ecológica urbana.

La huella ecológica es un término que determina el impacto medioambiental de una entidad, que puede ser una persona, ciudad, región, estado o todos los habitantes de nuestro planeta, y lo cuantifica como una función de los recursos naturales que consume esa entidad para cubrir sus necesidades propias. Estas necesidades incluyen todas las actividades de consumo, incluyendo alimentos, materiales y vivienda, a la vez que tiene en cuenta el impacto tanto de los residuos generados, como de su transporte. Esta métrica nos permite comparar actividades y sus impactos sobre el medio ambiente y recursos naturales.

La huella ecológica ha sido muy importante como herramienta de concienciación, ya que manifiesta de una forma muy gráfica la problemática de la sostenibilidad mundial y muestra la necesidad de un cambio en nuestro modo de vida y nuestras ciudades por medio del uso de simplificaciones que proporcionan al público información básica sobre la situación de nuestro planeta.

La huella ecológica se mide en los llamados hectáreas globales (gHa). Hectárea global es 1 hectárea de espacio biológicamente productivo (basándose en la productividad media mundial). La bio-productividad (productividad biológica) es la productividad biológica por hectárea y por año. Ésta productividad biológica se mide normalmente como la acumulación de biomasa por año. Biocapacidad es la capacidad de producción biológica durante dado el año en un área biológicamente productiva, también expresa en hectáreas globales. (Hudekova, Krajcsovics, Martin, Pauditšová, & Reháčková, 2007).

En 2001, la Biosfera tenía 11,2 billones de hectáreas de áreas biológicamente activas que correspondía aproximadamente a una cuarta parte de la superficie del planeta. De éste área total, 2,3 billones de hectáreas estaban cubiertas de agua y 9 billones de hectáreas de tierra seca. Del total de tierra seca, la tierra consiste en 1,5 billones de hectáreas de tierras de cultivo, 3,5 billones de hectáreas de pastos y 3,9 billones de hectáreas de bosques (Wackernagel, 2004), (Hudekova, Krajcsovics, Martin, Pauditšová, & Reháčková, 2007).

En base a los datos disponibles, la huella ecológica mundial muestra que consumimos más de lo que se produce y a su vez se crea más basura de la que nuestro ecosistema puede asimilar. También entran en este escenario elementos añadidos que complican aún más este ciclo metabólico en las ciudades; techos de atrapan calor y edificios sobrecalentados durante la noche que calientan el aire favoreciendo la formación de ozono y agravando los problemas de salud. Del mismo modo, el agua de escorrentía fluye al sistema de saneamiento que conduce el agua a la planta de tratamiento. Esta escorrentía se encuentra contaminada con residuos de los techos y calles sin un tratamiento previo y requiere una gran cantidad de energía para su tratamiento. La figura siguiente sintetiza los efectos positivos de la cubierta ajardinada y cómo revierten en una reducción de la huella ecológica:

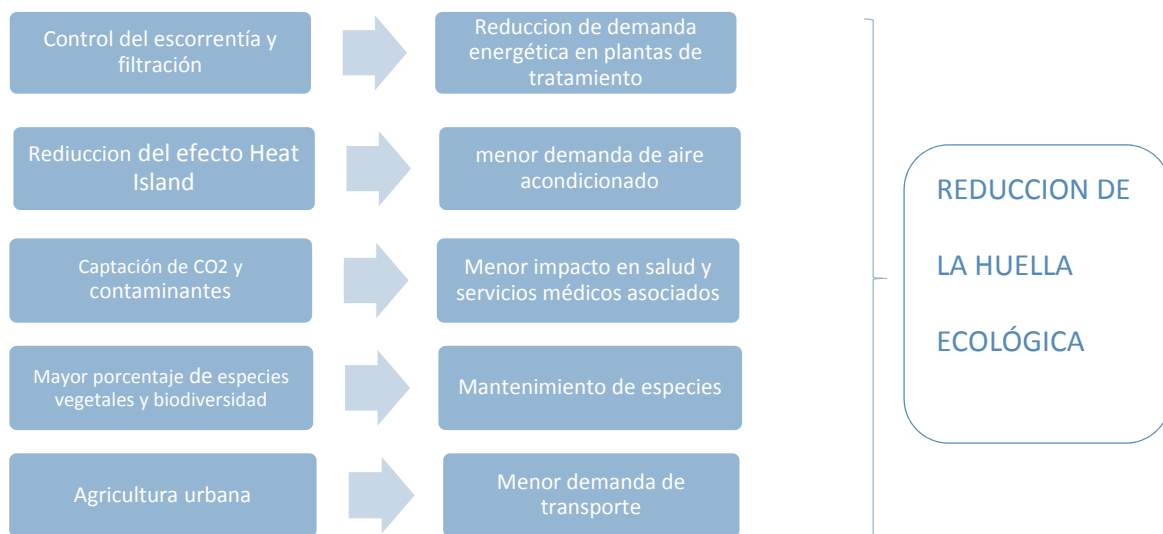


Figura 2 Impacto de la cubierta ajardinada sobre la Huella Ecológica

Si entendemos la huella ecológica como la expresión numérica del impacto humano sobre el territorio, podemos asumir que existe relación directa entre el valor de la huella ecológica, el grado de estabilidad ecológica del territorio y el nivel del impacto causado por las actividades humanas.

Un uso intensivo del territorio se acompaña de cambios en las características de la estructura del paisaje caracterizado sobre todo por la pérdida de componentes naturales y semi-natural (bosques, prados, jardines) y también por el crecimiento simultáneo de impactos negativos, tales como contaminación del agua y del aire, etc. A nivel mundial se habla de cambio climático, a nivel de las aglomeraciones urbanas que hablamos de isla de calor urbano.

La urbanización, ha transformado el ecosistema natural donde se ubican en sistemas inestables e ineficientes. Desde el punto de vista de ecosistema, Manuel De Landa las define como “islas”, no sólo desde el punto de vista térmico, si no desde el punto de vista de su diversidad. Los ecosistemas urbanos están poblados por especies tanto animales como vegetales muy limitadas, domesticadas y desnaturalizadas. Con un trama tan simplificada que limita en gran medida la estabilidad y



resiliencia de los ecosistemas urbanos, incrementando su vulnerabilidad y capacidad de adaptación y respuesta a unas condiciones tan cambiantes como las que se experimentan y pronostican para este siglo XXI (Landa, 1999).

La estabilidad ecológica es la capacidad de un ecosistema para hacer frente a un período de estrés o perturbación y/o retornar posteriormente tras el cese del mismo al estado normal (Hernández, Urcelai, & Pastor, 2002). La estabilidad ecológica crece a medida que aumenta el porcentaje de componentes naturales y está muy influenciada por el tamaño y el número de superficies activas en la mitigación de fenómenos climáticos extremos. En este contexto, las áreas verdes urbanas y entre ellas, las cubiertas ajardinadas, juegan un rol irremplazable en la labor restaurar y mantener esta estabilidad.

En cuanto a su relación con el microclima, las metodologías de cálculo tradicionales de la Huella Ecológica de las ciudades, no incluían la calidad del entorno urbano en su cálculo. Las nuevas metodologías de cálculo de la Huella Ecológica proponen que los procedimientos de cálculo basados en el consumo de recursos en las áreas de vivienda, transporte, alimentos, bienes y servicios, incluyan también la función microclimática y estabilidad ecológica del territorio de la ciudad. Este factor representa la calidad ambiental urbana, y es una función del porcentaje de área natural en el desarrollo, al ser éste uno de los indicadores básicos de la estabilidad ecológica del territorio.

Este impacto activo en el micro-clima se expresa por el “coeficiente función del microclima” ue es un término que se incluye en el cálculo de la huella ecológica y se usa para expresar la contribución de la vegetación del microclima sobre el territorio. Matemáticamente, el coeficiente función del microclima (KMF) se presenta como un denominador en el cálculo de la huella ecológica y así, el coeficiente más alto de la función micro-climática (por ejemplo, alto porcentaje de bosques en el territorio), tiene el valor más bajo de la huella ecológica (Hudekova, Krajcsovics, Martin, Pauditšová, & Reháčková, 2007):

$$EF = (\text{aliment EF} + EF_{\text{shelter}} + EF_{\text{transport}} + EF_{\text{goods}}) / KMF).$$

El coeficiente EF estará en el rango de valores de 0.8 – 1.2 que se fijan para que no se sobreestime la función micro clima. El coeficiente función del micro clima para un territorio dado se calculará en base a la formula siguiente (Sabo, 2005):

$$KMF = \sum_{i=1}^n p_i \cdot Kmfi / p$$

*Kmf* – coeficiente de función micro clima de la zona de

*p* - área de un territorio dado / modelo

*p<sub>i</sub>*- unidades territoriales determinadas basados en tasa de cobertura por número de árboles

*kmfi* – coeficiente función de micro clima de unidades territoriales de un determinado ámbito

*n* – número de unidades territoriales

Esta metodología de cálculo de la huella ecológica pone de manifiesto el vínculo entre el desarrollo urbano sostenible, la calidad de vida de los habitantes urbanos y su ligadura a la calidad del medio ambiente y las áreas verdes, resaltando la importancia de alcanzar y mantener la estabilidad ecológica del territorio para afrontar los riesgos del cambio climático.

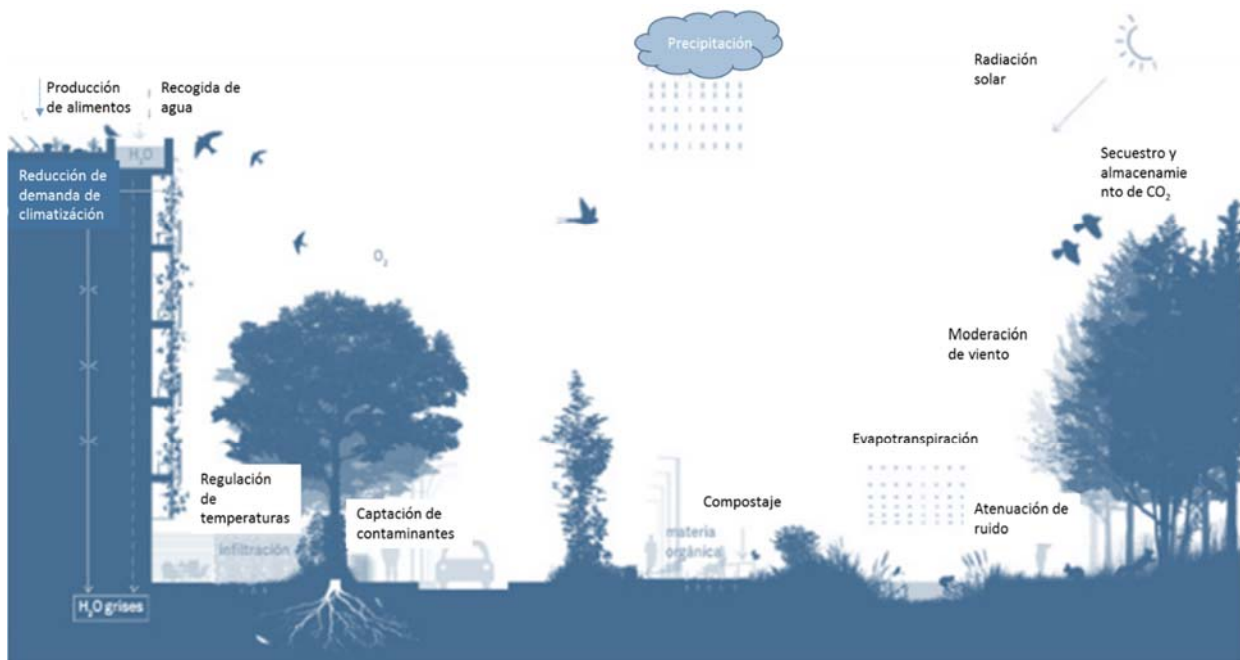


Figura 3 Representación de los aspectos urbanos afectados por los sistemas vegetados urbanos (Ajuntament-de-Barcelona, 2011).

Por todo lo anterior, la instalación generalizada de cubiertas ajardinadas puede colaborar a resolver problemas medioambientales asociados con el crecimiento de las ciudades, reducir su huella ecológica y convertirse en una solución factible para los núcleos urbanos en los que la especulación del terreno no permite la creación de espacios verdes a nivel de suelo.

## 2.1 INTEGRACIÓN DE CUBIERTAS AJARDINADAS EN LA TRAMA URBANA

A pesar de que los múltiples beneficios que aportan han sido ampliamente documentados, las cubiertas ajardinadas todavía no forman parte de la práctica constructiva ya que aspectos tales como el mayor coste, (Wong, et al., 2002) y la incertidumbre de su comportamiento a largo plazo, constituyen barreras para su implementación a gran escala. A pesar de estas barreras, las cubiertas ajardinadas se incluyen como estrategias recomendadas por los Sistemas de evaluación de la sostenibilidad de los edificios tales como el sistema de puntos desarrollado por el U.S. Green

Building Council's "Leadership in Environmental and Energy Design" (USGBC, 2009), BREEAM (British-Research-Establishment, 2013) y la directiva Europea SAVE, COM 2002/91/EC (UE, 2002), encargada de promover la eficiencia energética en edificios, incorporan las cubiertas ajardinadas como herramientas de diseño en pro de una mejora de su sostenibilidad. Uno de los objetivos de estos sistemas es el proveer herramientas para facilitar la implementación de las cubiertas ajardinadas a través de los sectores público y privado.

Hasta ahora, las cubiertas ajardinadas se han instalado mayoritariamente en edificios singulares tales como edificios de oficinas o comerciales. Sin embargo, varios estudios remarcan el peso del impacto ambiental del sector residencial en el ámbito urbano (Ochoa, Hendrickson., & Scott Matthews, 2002), indican que el sector residencial en EEUU representa un 26% del total de la energía consumida, y alrededor de un 24% de las emisiones de efecto invernadero. Aún más, el sector residencial representa una gran parte de la superficie construida en las ciudades. Por ejemplo en España, el uso residencial representa un 82% de la superficie total construida en el país (Fomento, 2004). Este hecho trae a la luz el alto potencial de los edificios de uso residencial para la incorporación a gran escala de cubiertas ajardinadas, y evaluar su impacto en la escala de barrio.

Este potencial ha llevado a que las cubiertas ajardinadas se transformen en una estrategia prescriptiva por medio de su inclusión en ordenanzas de la edificación en algunas ciudades del mundo. Toronto, en el 2009, sacó una ordenanza (City of Toronto By-law No.583-2009, 2009) que aplica al nuevo permiso de construcción, tanto de edificios residenciales, comerciales e institucionales realizados después de 31 de enero de 2010 y que desde Abril del 2012 se ha ampliado a los nuevos desarrollos industriales. Esta ley obliga a instalar cubiertas verdes en edificios de más de 2,000 m<sup>2</sup> edificados exigiendo entre un 20 y un 60% de cubierta verde.

Esta normativa y su guía de implementación (Toronto Green Roof Construction Standard-Supplementary Guide, 2010) dio como resultado en sus dos primeros años de implementación la construcción de 1,2 millones de m<sup>2</sup> verdes en desarrollos comerciales, institucionales y residenciales en altura, generando un ahorro energético anual de más de 1,5 millones de kWh/año, más de 125 empleos relacionados con el diseño e instalación de las cubiertas y una reducción de

más de 12.177 m<sup>3</sup>/ año (Green Roof for Healthy Cities, 2012) en el agua de pluviales vertida a la red de saneamiento. Posteriormente Chicago y Nueva York han tomado medidas similares al igual que Tokio y Buenos Aires.

En Europa encontramos casos significativos como Suiza, donde es obligatorio incluir cubiertas verdes en todos los edificios nuevos, y recientemente, Copenhague aprobó una ley que obliga a los propietarios de nuevos edificios a tener algún tipo de vegetación en sus techos con objetivos de eficiencia ambiental. Además, ha iniciado planes de adaptación para los edificios más antiguos ya que en la actualidad Copenhague posee alrededor de 20.000 metros cuadrados con azoteas en donde es posible implementar estos desarrollos. También existen al menos 30 edificios con techos verdes y se prevé que la nueva ley incrementará anualmente 5.000 metros cuadrados de techos verdes correspondientes a nuevas construcciones.

El caso de España no es diferente, al margen de algunos edificios significativos construidos en los últimos años, ciudades como Barcelona ya han tomado nota y han pasado a la acción. El 67% de las cubiertas de los edificios de Barcelona son susceptibles de acoger actividades, instalaciones de aprovechamiento de la energía e incorporar cubiertas verdes y el Ayuntamiento promueve actualmente actuaciones para que las cubiertas de la ciudad se conviertan en espacios de uso comunitario y nuevos espacios de verde urbano, en un plan enmarcado en los objetivos del Plan del Verde y la Biodiversidad de Barcelona (Ajuntament-de-Barcelona, 2011). En este sentido, se promoverá la dinamización y activación social de las cubiertas, a la vez que se fomentará la rehabilitación de los edificios existentes desde el punto de vista energético o de incremento del verde y la biodiversidad para avanzar hacia el objetivo de Barcelona como ciudad autosuficiente. Para el desarrollo de este proyecto, el Ayuntamiento de Barcelona ha puesto en marcha una línea de ayudas a la re-naturalización, con financiación del 50% (y un tope de 60.000 euros), a los proyectos de ajardinamiento de las cubiertas.

El ayuntamiento de Madrid, también plantea la incorporación de métricas en los sistemas de desarrollo urbano que permiten garantizar la inclusión de un porcentaje mínimo de área vegetada

en asociada a cada parcela en desarrollo. Esta superficie verde puede encontrar su espacio en la cubierta, convirtiendo así a la cubierta ajardinada en una herramienta de cumplimiento de normativa y reduciendo el impacto de estos requisitos sobre la ocupación y edificabilidad de la parcela.

Para poner en valor esta estrategia plenamente, es necesario un mejor entendimiento de los “servicios de los ecosistemas” que las cubiertas ajardinadas proporcionan en las zonas urbanas, de cómo sus componentes bióticos y abióticos contribuyen a los servicios de ecosistema global y una mejor comprensión de las interacciones entre los elementos del ecosistema, especialmente las relaciones entre sus componentes estructurales, (suelo y vegetación) y las interacciones con la comunidad, tanto animal como urbana en el contexto de los mecanismos sobre los que funcionan los ecosistemas (Oberndorfer, et al., 2007). Este entendimiento es necesario para poder evaluar la eficacia de los techos verdes en comparación con otras tecnologías con fines similares y en última instancia se centran en las estimaciones de beneficios agregados a escalas de paisaje y en el análisis de costo-beneficio más integral

Con este fin se ha centrado esta investigación en el estudio del impacto de las cubiertas ajardinadas y el servicio al ecosistema urbano que proporcionan dentro de la categoría de regulación del microclima urbano, con el fin de evaluar su impacto sobre los factores abióticos<sup>1</sup> que determinan el microclima urbano de una forma cuantitativa y analizar los parámetros bióticos<sup>2</sup> y abióticos que lo condicionan dentro del biotopo<sup>3</sup> urbano. De acuerdo con la etimología de micro-clima, la escala del estudio se limita a las condiciones en un entorno de dimensiones finitas de calle o vecindario,

---

<sup>1</sup> Son los distintos componentes que determinan el espacio físico en el cual habitan los seres vivos; entre los más importantes podemos encontrar: el agua, la temperatura, la luz, el pH, el suelo, la humedad, el oxígeno y los nutrientes. Específicamente, son los factores sin vida que conforman un ecosistema. (Loyola, 2003).

<sup>2</sup> Biótico o Biocenosis, conjunto de poblaciones vivas que viven en un entorno o biotopo (Loyola, 2003)

<sup>3</sup> Territorio o espacio vital cuyas condiciones ambientales son las adecuadas para que en él se desarrolle una determinada comunidad de seres vivos o biocenosis. (RAE, 2014).

dentro de un entorno próximo al nivel del suelo para capturar la interacción de los elementos físicos que condicionan el ambiente urbano y su efecto sobre la comunidad humana que lo habita.

Puesto que el cambio climático y el efecto isla de calor son los principales problemas que afectan a la ciudad desde el punto de vista micro-climático, este estudio se centra en las condiciones de verano, al ser este el escenario más crítico de cara a la evaluación de las cubiertas ajardinadas como elemento de regulación de temperaturas.

### 3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Esta tesis fija un objetivo principal y tres objetivos parciales a alcanzar con el desarrollo de la investigación:

#### 3.1 OBJETIVO PRINCIPAL

El principal objetivo es el poder evaluar cuantitativamente el impacto de las cubiertas ajardinadas sobre la temperatura del aire y la humedad en el microclima urbano de verano dentro de la escala de vecindario y en el nivel peatonal

#### 3.2 OBJETIVOS PARCIALES

Adicionalmente se han definido los siguientes objetivos parciales:

- Identificar los modelos numéricos y herramientas de cálculo capaces de capturar el efecto de la cubierta ajardinada sobre el microclima.
- Identificar los parámetros potenciadores o limitadores de este efecto
- Cuantificación del impacto del microclima generado sobre el consumo energético de los edificios



#### 4. HIPÓTESIS DE PARTIDA

La hipótesis de partida para el desarrollo de esta investigación es la siguiente:

**“La cubierta vegetal extensiva instalada en edificios de media altura favorece la creación de microclimas a nivel peatonal y reduce las temperaturas del aire a nivel peatonal en el entorno urbano en el que se ubican ”.**

Esta hipótesis viene derivada de los estudios e investigaciones previas que ya han demostrado que:

- La cubierta ajardinada mantiene la temperatura de la cubierta del edificio similar a la temperatura del aire.
- La cubierta ajardinada reduce el efecto isla de calor. (Santamouris M. , 2014)
- La cubierta ajardinada reduce el consumo energético en los edificios por la reducción de ganancias térmicas en verano (Del Barrio, 1998) (Saiz, Kennedy, Bass, & Pressnail, 2006)

## 5. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación se estructura en una secuencia de trabajos orientados a la correcta definición y delimitación del marco de la investigación, a la consecución de los objetivos expuestos y verificación de las hipótesis planteadas.

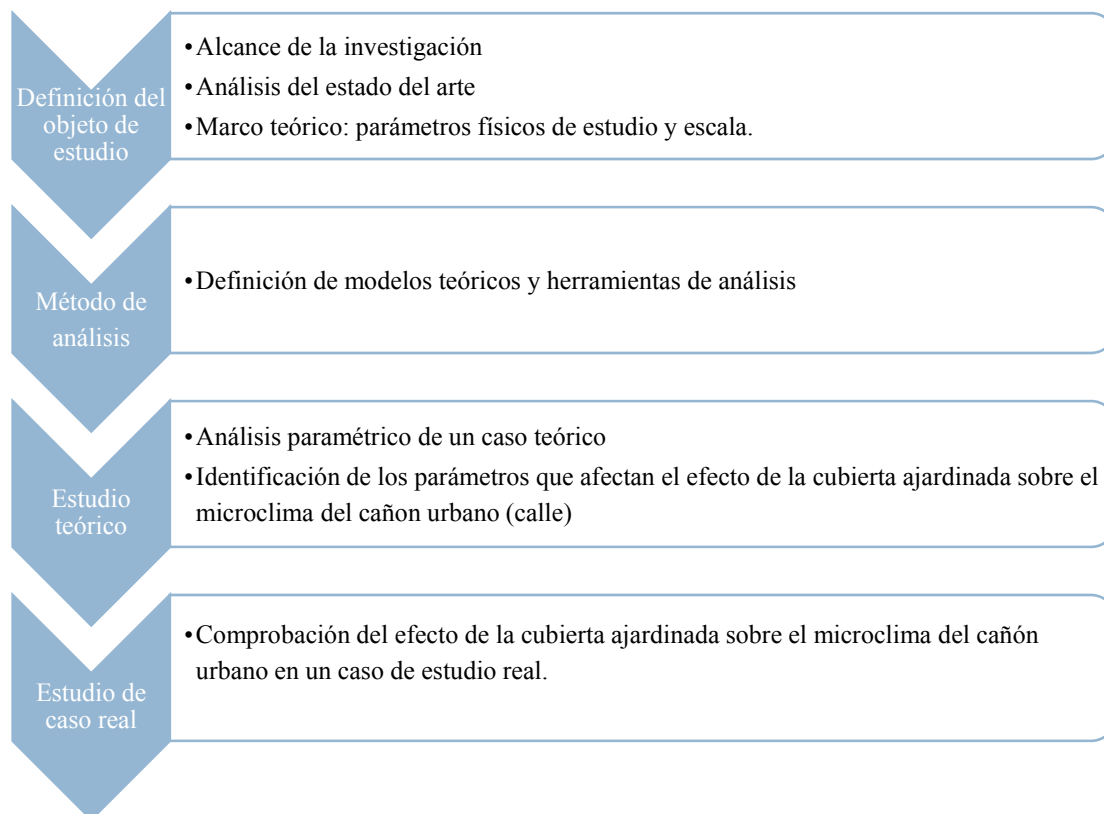
Para este fin, el primer paso ha sido la definición del objeto de estudio, por medio del análisis y la revisión de trabajos teóricos y empíricos que investigan los efectos de las cubiertas ajardinadas en el entorno construido, en el contexto de su uso como herramienta de adaptación y mitigación del impacto del desarrollo urbano y el cambio climático en las ciudades.

Este fenómeno de calentamiento urbano y cambio climático se ha estudiado ampliamente a lo largo de las últimas décadas, abordándose desde diferentes perspectivas y escalas. Desde el ámbito regional por medio del estudio de los fenómenos meteorológicos que marcan la evolución del clima, pasando por la escala local o mesoescala por medio del estudio de la problemática de la isla de calor, hasta el edificio y su comportamiento energético. Su comprensión requiere el análisis físico y dimensional de éste fenómeno tan amplio, por medio del entendimiento de cada uno de los factores que lo originan y de cómo las estrategias vegetales, y más en concreto las cubiertas ajardinadas, interactúan con ellos.

El análisis de la literatura existente en este campo revela el gran potencial de los sistemas vegetales como herramienta de diseño pasivo capaz de mejorar las condiciones microclimáticas en las ciudades, así como su impacto positivo sobre el comportamiento energético de los edificios. Sin embargo, la escala de calle, en la que confluyen no sólo los efectos climáticos ambientales si no las variaciones que la geometría y superficies urbanas provocan sobre la climatología local, exige una metodología de análisis específica en la que tanto la respuesta térmica de los edificios, las variaciones en los patrones de viento y la interacción de la vegetación, se integren y examinen cuantitativamente para definir las estrategias más efectivas para lograr uno de los principales objetivos del espacio urbano, su habitabilidad, y como efecto colateral, la mejora del

comportamiento energético en su conjunto. En esta escala tan específica existe un nicho abierto al estudio, en el que el estudio pormenorizado para cada clima, condición urbana y estrategia vegetal propuesta, está por explorar.

El proceso de esta investigación realizada sigue el siguiente esquema:



Este proceso conduce a la **verificación de las hipótesis** planteadas y a la **comprobación de la consecución de los objetivos principales y parciales propuestos** por medio de la delimitación del estudio, la identificación de herramientas y modelos capaces de capturar este efecto potencial, identificación de los parámetros físicos más críticos tanto del entorno urbano, como del clima y de los sistemas vegetales en relación con la escala de estudio, y la estrategia de cubiertas ajardinadas por medio de modelización numérica usando herramientas de software para su desarrollo. Por último, la comprobación experimental por medio de mediciones del efecto de las cubiertas ajardinadas sobre los parámetros físicos que son objeto de análisis. Esta comprobación

no tiene como objeto la validación experimental del modelo numérico, si no la comprobación del orden de magnitud y tendencia de los resultados obtenidos por medio de la modelización.

Los resultados de los modelos numéricos han sido usados para la definición de los perfiles hidrotérmicos en el microclima analizado y calcular su influencia en el comportamiento energético de los edificios que configuran la estructura urbana que configura la calle en el caso de estudio experimental. De estos estudios se han extraído las conclusiones más relevantes y se han propuesto líneas de investigación futura que se podrían desarrollar a raíz de este trabajo.

La investigación se ha centrado en el clima mediterráneo, usando Madrid como ubicación geográfica, y dado que el efecto del cambio climático en este tipo de clima es más problemático en verano, el estudio se ha enfocado a las condiciones de verano.

El siguiente esquema muestra los límites del estudio realizado:

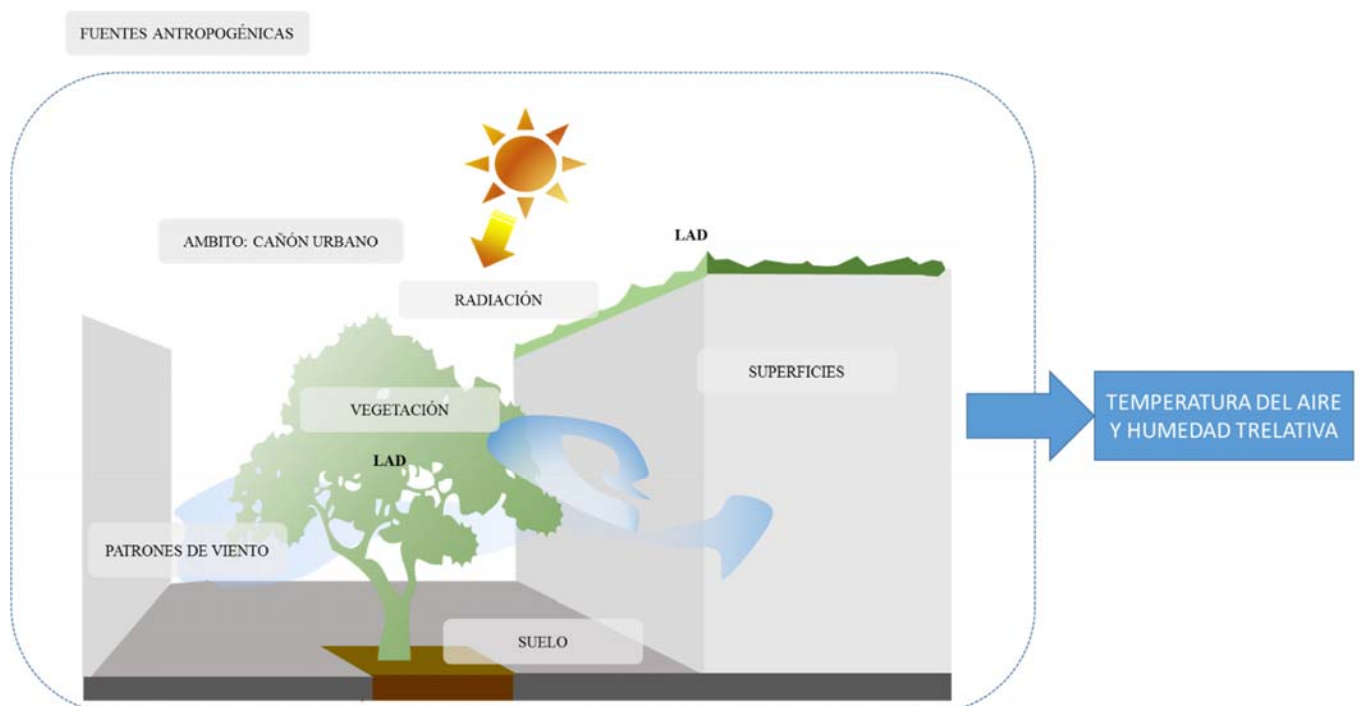


Figura 4 Límites de estudio y parámetros analizados

Los límites de estudio incluyen la geometría, características superficiales de los límites del sistema, patrones de viento en el cañón urbano con diferentes condiciones de viento a nivel de mesoescala, y diferentes tipos de vegetación en cubierta caracterizados por el LAD. Las fuentes de calor antropogénicas no se han incluido en este estudio.

Los parámetros analizados se han definido en base al objeto de estudio, a la información disponible y a la capacidad del modelo. En base a los elementos que integran en el estudio los parámetros analizados han sido la **temperatura del aire y la humedad relativa**.

## 6. MARCO TEÓRICO

Este estudio aborda el análisis del impacto de la cubierta ajardinada en el microclima local. Para centrar el problema analizado, el primer paso es definir el objeto de análisis identificando y describiendo los factores y procesos más relevantes incluidos en esta investigación, así como la escala de análisis. Las siguientes secciones definen el clima, la base teórica y los conceptos que fundamentan la física de los microclimas, así como los factores derivados de estos:

### 6.1 CLIMA

El término “Clima” se define como la síntesis de las condiciones atmosféricas que caracterizan un lugar y se define por medio de los valores medidos medios de varios parámetros meteorológicos y por las probabilidades de la ocurrencia de otras condiciones, incluidos eventos extremos” (Linacre & Geerts, 1997).

Las mediciones de los observatorios meteorológicos son valores medios representativos de un área concreta, sin embargo, para entender los efectos del clima en el entorno habitado urbano, sus habitantes, sus edificios y los demás organismos que lo habitan, no se pueden usar directamente estos resúmenes climatológicos ya que las condiciones del clima en éste estrato próximo a la superficie del suelo, están influidas por diversos factores que pueden cambian rápidamente. La velocidad del aire, se ralentiza por efecto de la fricción cuanto más nos acercamos a esta franja que Geiger denomina “near the ground” comprendida entre la cota 0 y 1,5 m sobre el nivel del suelo (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927), así mismo, el aire se mezcla menos y el efecto de la radiación solar absorbida por los pavimentos y paramentos verticales, que se reemite al aire es más notable. El suelo, es a su vez una fuente de vapor de agua que se evapora en el aire, así como partículas en suspensión y gases que se diluyen en la atmosfera.

Geiger, clasifica los fenómenos climáticos en cuatro escalas diferentes, dependiendo de sus características horizontales, verticales y temporales:

Tabla 1 Escalas espaciales y temporales del clima

(Yoshino, 1975)

Escala	Definición	Horizontal m	Vertical m	Temporal sg.
<b>Microclima</b>	Clima de una zona específica con características cambiantes que dependen de sus características físicas y exposición solar	$10^{-3} - 10^2$	10	<10
<b>Clima local</b>	Clima de una localidad diferenciado de las zonas que lo rodean y definido por cambios en su superficie a gran escala (áreas de bosque, lagos, ríos,..) y su topografía.	$10^2 - 10^4$	$5 \cdot 10^{-3} - 10^3$	$10 - 10^4$
<b>Mesoclima</b>	Clima de una región, definido por grandes accidentes topográficos, océanos, mares y su ubicación geográfica.	$10^3 - 2 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^2 - 4 \cdot 10^3$	$10^4 - 10^5$
<b>Macroclima</b>	Clima a nivel continental determinado por los sistemas de circulación atmosférica a gran escala.	$> 2 \cdot 10^2$	$10^3 - 10^4$	$10^5 - 10^6$

Las siguientes imágenes muestran gráficamente cada una de las escalas climáticas:

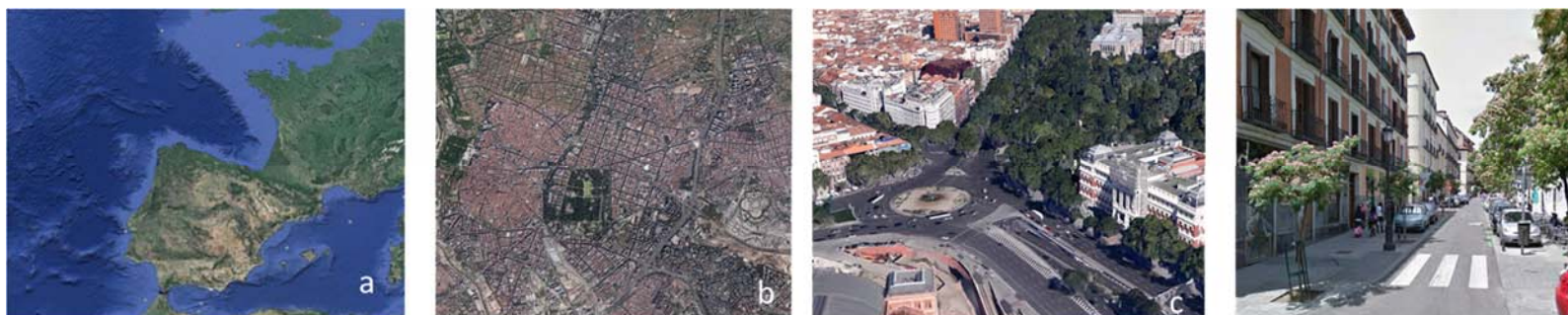


Figura 5 Representación de escalas climáticas (a. macroclima: vista satélite de España; b. mesoclima: vista aérea de Madrid; c. clima local: vista zonal de Madrid; d. microclima: vista peatonal Calle Santa Isabel en Madrid).

El factor temporal también afecta al clima en todas sus escalas, ya que el clima depende del movimiento del planeta, rotación y traslación, que dan la pauta para los cambios secuenciales climáticos.

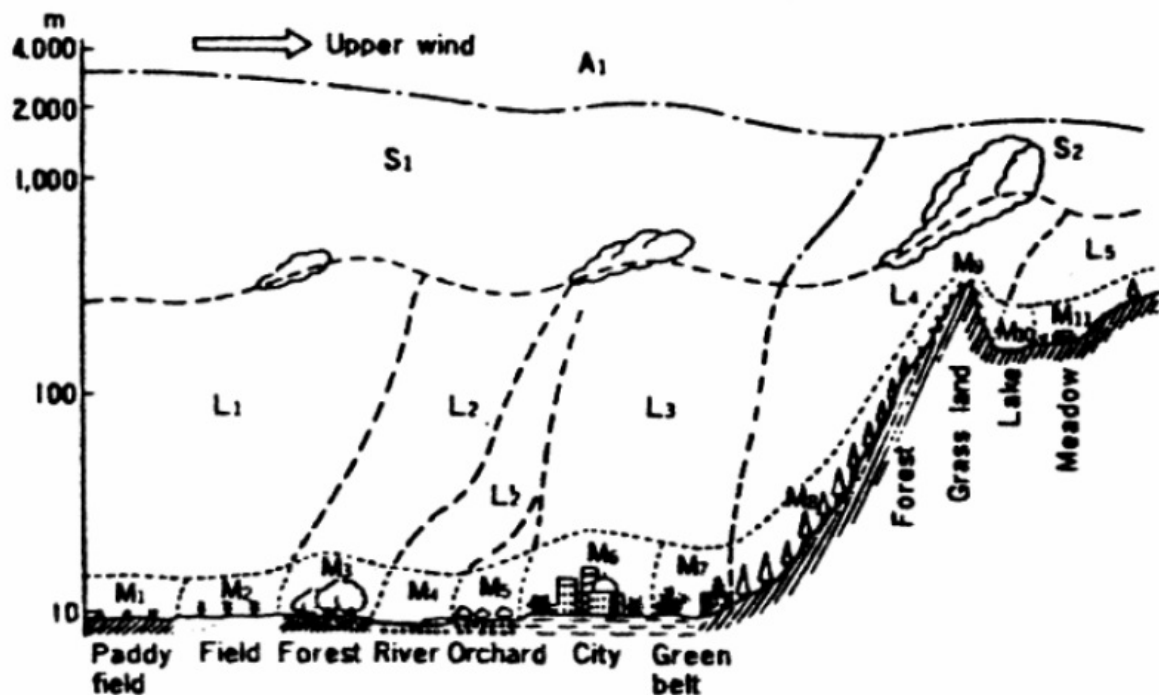


Ilustración 6 Esquema de las escalas climáticas: M-micro, L-Local, S-Meso, y A-Macro (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927).

Esta tesis se realiza sobre la escala microclimática, en el ámbito peatonal de la zona urbana. Las definiciones, características específicas, variantes y factores que lo determinan se analizan en la siguiente sección.

## 6.2 MICROCLIMA: DEFINICIÓN Y FACTORES QUE LO DETERMINAN

### 6.2.1 MICROCLIMA

La palabra microclima proviene del griego y está formada por “micrón” cuyo significado es muy pequeño, más “klíma”, originalmente con el sentido de inclinación del sol, y por extensión pasa a ser latitud, clima, zona geográfica, que llega al latín como clima (climatis). De este modo, se puede señalar que el concepto original de este vocablo es el resultado de la acción de un muy pequeño



clima. Entre sus múltiples definiciones, podemos seleccionar la que lo define como un “sector terrestre de reducidas dimensiones participe de unos rasgos particulares en relación al entorno en que se integra debido a condiciones naturales particulares o a modificaciones artificiales introducidas por el hombre”. Espacialmente, abarca un área de entre 100 a 1 km de radio (Olcina-Santos, 1996). Dentro del ámbito de la ecología, se define como “un clima local de características distintas a las de la zona en que se encuentra” (RAE, 2014).

Esta condición climática específica se halla condicionada por los elementos que lo confinan y los fenómenos que se desarrollan en esta capa cercana al suelo que no son comprensibles sin soporte experimental. Sin el entendimiento de esta capa cercana al suelo, no se puede comprender el microclima (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927). Por esta razón es necesaria la rama de la ciencia que Geiger denomina “micrometeorología”, y la comprensión de los principios físicos básicos que rigen esta ciencia y que se explican más adelante.

Los microclimas están afectados por factores abióticos como la humedad, el viento, la temperatura, el rocío, la evaporación, el tipo de suelo y superficies que lo rodean, la topografía del lugar, su exposición solar, la elevación, la estación del año y la latitud. También intervienen factores bióticos como la vegetación y los organismos que lo habitan. Una variedad de microclima es el microclima urbano, al que se añaden también elementos externos antrópicos, como la construcción y las emisiones. El siguiente apartado se centra en los fenómenos que caracterizan el microclima urbano.

---

### Microclima Urbano

Además de existir determinados microclimas naturales, existen otros generados artificialmente, y son los creados fundamentalmente en las ciudades o áreas urbanas.

Las ciudades, son definidas por varios autores como ecosistemas con un metabolismo lineal de intercambio abierto, caracterizado por los grandes recorridos horizontales de los recursos de agua, alimentos, electricidad y combustibles que genera y por su capacidad de explotar otros ecosistemas lejanos para su propia subsistencia, provocando importantes desequilibrios territoriales. En este tipo de ecosistemas, no existe un equilibrio entre los flujos que entran y los que salen. Se consumen

recursos y se producen desechos sin un equilibrio que permita su autonomía. Este sistema es opuesto al de un ecosistema natural que se caracteriza por ser un sistema circular cerrado de intercambios y donde el transporte de materias y energía es eminentemente vertical, y donde el intercambio gaseoso que en los ecosistemas naturales se reduce a la fotosíntesis y la respiración, mientras que en el medio urbano se incluyen también los gases de origen antrópico como la combustión de calefacciones, coches e industrias (Higuera E. , 1998), (Fariña, 1998).

Los principales factores que condicionan el microclima urbano son los derivados de su configuración morfológica que modifica el flujo de energía y las emisiones de calor, así como de la energía y contaminación derivadas de las aglomeraciones de personas, los equipos de acondicionamiento de los edificios y el tráfico. Esto provoca un alto índice de contaminación y una temperatura anual y radiación solar superior a otras áreas suburbanas o rurales, con velocidades de viento y humedad atmosférica muy inferiores a las de su entorno.

La ciudad actúa como un sistema de almacenamiento térmico a gran escala que se caracteriza por su temperatura más elevada que en las áreas naturales circundantes, el efecto isla de calor definido previamente. Hay numerosas causas para este efecto, incluyendo el reemplazo de áreas con vegetación por edificios y superficies duras. Estas temperaturas más altas urbanas tienen un impacto muy importante no solo sobre el confort, sino también en la demanda de electricidad para aire acondicionado (Santamouris M. , Heat Island Effect, 2001) y es especialmente crítico en climas templados y cálidos donde aumentan los periodos en los que el enfriamiento nocturno es posible.

De acuerdo con Turmini, las características principales del microclima urbano son (Turmini, 2012):

- Temperaturas mayores que su entorno, especialmente en el periodo nocturno.
- Reducción de la amplitud térmica diaria y modificación de las horas pico de temperatura.
- Modificación del régimen de vientos en distribución e intensidad por la presencia de edificios y las turbulencias ocasionadas por la configuración geométrica y temperatura de las superficies urbanas.

- Modificación de la cantidad e intensidad de las precipitaciones, a consecuencia de la reducción de la evapotranspiración y los flujos ascendentes del aire.

La imagen siguiente muestra los principales factores que caracterizan el microclima urbano e influyen en su balance energético. Estos factores se analizan en detalle más adelante en el documento

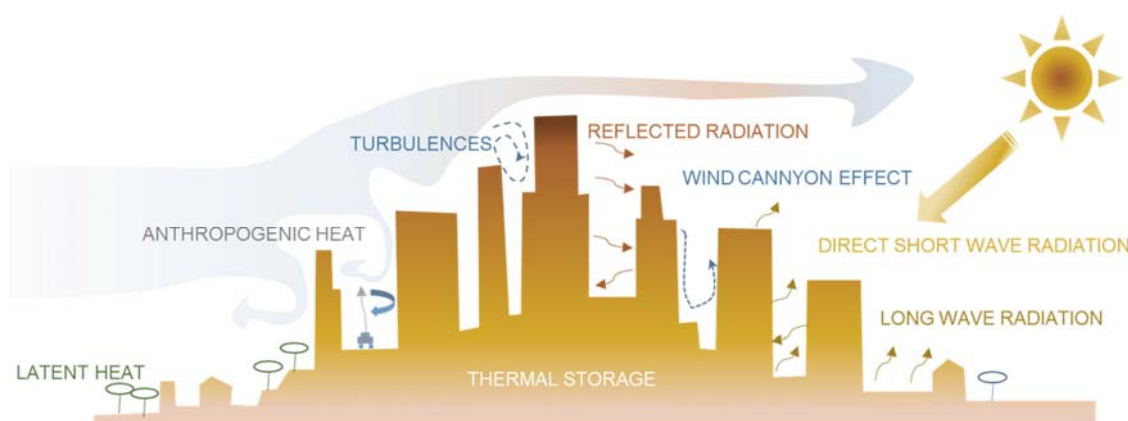


Figura 7 Componentes energéticos en el microclima urbano. Fuente: elaboración propia

### 6.2.2 ESCALA

El espacio urbano es un fragmento del espacio natural que ha sido delimitado con elementos construidos. Es el espacio que queda libre entre los edificios y su definición geométrica depende de la disposición de las fachadas que lo delimitan. (Krier, 1975).

Morfológicamente, Ochoa, define tres ámbitos dentro del espacio urbano; espacio interior, exterior y espacio intermedio. El interior, confinado en sus tres dimensiones, frente al exterior, delimitado en dos de sus dimensiones por el suelo y los edificios que lo rodean. Frente a estos, el espacio intermedio se presenta como una prolongación del interior al exterior. (Ochoa de la Torre & Serra Florensa, 1999). En esta definición, también se identifica cual es la relación de la vegetación con cada tipo de espacio, y las implicaciones para el balance energético en el espacio afectado por la vegetación y por consiguiente el confort humano. La presencia de la vegetación en el espacio

urbano puede darse en el espacio interior confinado, afectando el confort interior e indirectamente el balance energético del edificio, puede darse en el espacio exterior e intermedio, modificando el ambiente que rodea al edificio y su balance energético, o también puede ser parte de la piel del edificio, modificando las propiedades ópticas y térmicas de los elementos constructivos en los que se implanta y por tanto el balance energético en la envolvente y a su vez las condiciones exteriores del edificio, alterando el balance energético del edificio con el exterior. Las cubiertas vegetales se enmarcan dentro de esta última categoría, ya que son un elemento vegetal integrado en la piel del edificio y cuya integración varía el balance térmico de la cubierta, afecta al consumo energético del edificio, y al ambiente exterior al mismo. La cuantificación de este impacto es el objeto de este estudio.

El ámbito espacial de esta investigación es el espacio público confinado, el formato de calle o calle-plaza como espacio de circulación, definido por Ochoa como una porción de espacio público abierto, adyacente a la acera y estrechamente relacionado a la calle, un espacio de uso breve, de espera o descanso que tiene el formato de una acera ampliada a uno o ambos costados de la calle (Ochoa J. M., 1999). La siguiente figura muestra una representación de éste ámbito:

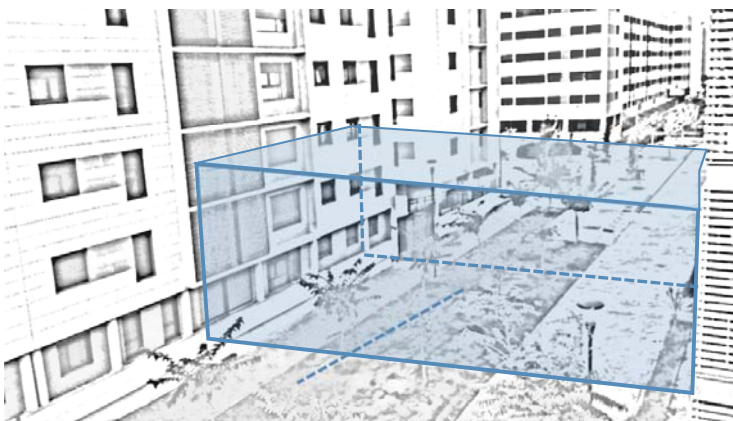


Figura 8: Ámbito de estudio: calle-plaza

A su vez, el espacio urbano tiene unas características biológicas que lo configuran como una estructura compleja que nace de su entidad espacial y sus habitantes, los seres humanos. El espacio urbano, la calle o plaza, configura la estructura socio-espacial contigua en escala a la del individuo

y su familia, una construcción que va más allá de su función de contenedor y que se caracteriza por tener una estructura socio-geométrica (Salíngaros & Pagliardini, 2010).

El carácter de calle, tiene por tanto una doble lectura, como elemento de conexión entre los edificios y en la trama urbana, y como elemento social de interacción, considerando su carácter tridimensional delimitado por suelo y fachadas verticales. Un espacio en el que las condiciones de confort son críticas para permitir su funcionalidad como elemento de conexión, interacción social y circulación. Por estas razones, la escala de estudio se centra en el espacio de calle-plaza, una escala en la que las características de su uso se benefician de factores que mejoren las condiciones de confort y la experiencia de sus habitantes.

Este estudio analiza el efecto de las cubiertas ajardinadas tanto en dos los parámetros que afectan al confort de los peatones, temperatura del aire y humedad, como en la identificación de unas condiciones exteriores a los edificios que alteran las condiciones intersticiales y el balance energético del conjunto.

---

### 6.2.3 FENÓMENOS FÍSICOS

La comprensión y análisis de la interacción de los elementos naturales en los microclimas urbanos se basa en los principios básicos que regulan la micrometeorología. Estos principios definen los componentes del balance energético que determinan en última instancia las condiciones térmicas e hidrométricas que caracterizan el confort urbano y definen los perfiles de temperatura y humedad que rigen los intercambios energéticos con los edificios y en consecuencia, la demanda de sus sistemas de climatización.

El enfriamiento evaporativo es posiblemente una de las maneras más eficientes de refrigeración pasiva de edificios y espacios urbanos en regiones calurosas (Givoni, 1991; Ken-Ichi, 1991). Las áreas verdes en las ciudades, además de mejorar el paisaje urbano, pueden regular el clima urbano, aumentando el contenido de humedad del aire y reduciendo su temperatura (Honjo y Takakura, 1990 – 1991). Datos experimentales muestran que el efecto de enfriamiento de los parques se debe al efecto combinado de la sombra y evapotranspiración y puede resultar en una reducción de la temperatura ambiente por 1 – 4,7 K (Barradas, 1998; CA et al., 1998; Upmanis, 1998; Shashua-

Bar y Hoffman, 2000). La diferencia de temperatura depende del tamaño del parque y la distancia al mismo. Además, el efecto de sombreado modifica las cargas de refrigeración en los edificios reduciendo la radiación solar incidente y la temperatura de sus superficies (Simpson, 2002). Varios autores indican que las superficies sombreadas son 5 – 20 K más frías que las superficies expuestas al sol (Robitu, Musy, Inard, & Groleau, 2005).

Los principios básicos que rigen éstos fenómenos son:

---

#### Fuente de energía principal: Radiación solar

Es considerado el componente meteorológico más importante por ser la fuente de energía que causa el movimiento atmosférico, las corrientes oceánicas y el ciclo hidrológico. Es el único mecanismo de intercambio energético entre la tierra y el resto del universo.

La radiación es la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas irradiada por los objetos por el hecho de estar a cierta temperatura. La cantidad de radiación emitida por un cuerpo negro<sup>4</sup> se expresa matemáticamente por la ley de Stefan-Boltzman, que establece que el calor que emiten los cuerpos es proporcional a su temperatura y en un cuerpo negro<sup>5</sup> perfecto vendría dada por la ecuación:

$$E = \sigma T^4$$

Donde  $\sigma$  es la constante de Stephan- Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$ ).

Sin embargo, la potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que la de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

---

<sup>4</sup> Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él.

Donde epsilon ( $\epsilon$ ) es una propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango  $0 \leq \epsilon \leq 1$ , esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende fundamentalmente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie. El flujo de calor que emana un cuerpo, depende de su superficie, por lo que el calor radiado por las superficies viene dado por:

$$Q_c = A \epsilon \sigma T^4$$

Donde  $Q_c$  es el calor transferido por radiación (w);  $A$  es la superficie del cuerpo ( $m^2$ );  $\epsilon$  es la emisividad (adimensional), que es una propiedad del material; y  $T$  es la temperatura del cuerpo (K),  $\sigma$  es la constante de Stefan Boltzman.

El calor incidente sobre un cuerpo es parcialmente absorbido incrementando la temperatura del cuerpo, parcialmente reflejado y parcialmente transmitido a través del cuerpo. La proporción en que esto ocurre depende de las propiedades superficiales del cuerpo conductancia ( $\alpha$ ), emitancia ( $\epsilon$ ) y transmitancia ( $\tau$ ) y guardan la siguiente relación:

$$\alpha + \epsilon + \tau = 1$$

La radiación solar incide sobre la superficie terrestre en dos formas:

- Radiación de onda corta proveniente desde el sol y el cielo.
- Radiación de onda larga, proveniente del cielo (radiación inter-reflejada).

La superficie terrestre absorbe y reemite una fracción de esa radiación en función de las propiedades ópticas y físicas de cada superficie.

---

### Mecanismos de transferencia de calor

El balance energético en la superficie terrestre viene dado por el equilibrio entre los flujos de energía y la atmósfera que se rigen por la primera Ley de la Termodinámica (conservación de la energía) que establece que “la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”. La energía que entra ha de ser igual a la energía que sale.

Para la mayoría de los sistemas naturales, la igualdad entre entrada y salida de energía, es válida solamente si tomamos largos períodos de tiempo, pero para períodos cortos, el balance energético difiere significativamente de esta igualdad. Esta diferencia se debe a que la energía se acumula, se consume y se libera periódicamente dentro del sistema. En términos climáticos un ejemplo sería cuando la energía térmica que es acumulada por el suelo durante el día y es liberada durante la noche, calentando el aire o bien otros cuerpos que estén en contacto con él.

La proporción de energía almacenada es función de las características físicas de cada elemento, su capacidad para almacenar energía (inercia térmica), su capacidad para transmitir, reflejar o absorber radiación y en su capacidad para transmitir calor por los mecanismos de transmisión de calor: convección, conducción y radiación.

- La transmisión por radiación se define como el mecanismo de transmisión de calor por ondas electromagnéticas debido a la diferencia de temperatura de los cuerpos, ya explicada en la sección previa.
- Conducción: es el mecanismo de transmisión de calor por medio del paso de calor entre las moléculas en contacto en un medio. La energía calorífica pasa de las moléculas con mayor temperatura a las de menor temperatura. La expresión matemática viene dada por la ley de Fourier, que cuantifica la cantidad de calor que pasa por un cuerpo con espesor  $dl$  con una diferencia de temperatura entre las dos caras opuestas del cuerpo de  $\Delta T$ .

$$Q_c/A = k\Delta T / dl$$

Donde  $Q_c$  es el calor transmitido por conducción (W);  $A$  es el área expuesta ( $m^2$ );  $k$  es el coeficiente de conductividad ( $W/m^2\text{°C}$ ), que es una propiedad del material;  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura ( $\text{°C}$ ); y  $dl$  el espesor del material (m). Cuando la conductividad se expresa para un espesor determinado se denomina conductancia.

$$C = k/l$$



Donde C es la conductancia ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ); k es la conductividad ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ ), y l es el espesor (m).

- Convección: la convección se refiere a los mecanismos de transmisión de calor en un fluido debido a los movimientos de masa en el fluido. La transmisión de calor se realiza por conducción entre las moléculas en contacto con el fluido en movimiento. El movimiento de las moléculas en el fluido se debe a diferencias en las densidades dentro del fluido debidas a diferencias en temperaturas. Este mecanismo se expresa matemáticamente por medio de la Ley de Newton, que se refiere al flujo de calor que se transfiere desde una superficie al medio circundante.

$$Q_c/A = hc\Delta T$$

Donde  $Q_c$  es el calor transferido por convección (W); A es el área ( $\text{m}^2$ ); hc es el coeficiente de convección ( $\text{W/m}^2\text{°C}$ ); y  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Los flujos de energía, se ven también afectados por los consumos inherentes a los procesos de cambio de estado. El fenómeno de la evaporación por el cual los líquidos cambian su estado físico de líquido a gaseoso, tiene asociado un consumo energético que viene formulado por la ecuación de Sprenger, la energía consumida en los procesos de evaporación es proporcional a la cantidad de agua evaporada tal y como se define en la ecuación previa:

$$Q = 666 A v$$

Donde Q es la energía consumida (W), y Av es la cantidad de agua evaporada (kg) y se determina por la ecuación que formuló Sprenger en base a la ley de Dalton:

$$A v = K A (P_{vs} - P_a)$$

Donde K es el coeficiente de evaporación, función de la velocidad del aire; A es la superficie de evaporación ( $\text{m}^2$ );  $P_{vs}$  es la presión de saturación a temperatura ambiente ( $\text{Kg/m}^2$ ); y  $P_a$  es la presión atmosférica ( $\text{Kg/m}^2$ ).  $(P_{vs} - P_a)$  es el denominado déficit higrométrico.

La tabla 2 indica los diferentes valores de energía requeridos para evaporar 1g de agua a diferentes temperaturas, (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927).

Tabla 2 Energía requerida para evaporar 1 gr de agua a diferentes temperaturas

T <sup>a</sup> (°C)	0	5	10	15	20	25	30
Energía (J/g)	2498	2486	2478	2465	2454	2440	2428

La tabla 3 contiene los radios de evaporación (mm/h) para una superficie dada en función de la temperatura del aire y la humedad relativa. (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927).

Tabla 3 Tasa de evaporación (mm/h) para una superficie plana

T <sup>a</sup> aire °C	Humedad Relativa %		
	100	80	60
10	0	0.06	0.12
20	0	0.11	0.22
30	0	0.20	0.41

#### 6.2.4 ELEMENTOS BIÓTICOS

La inclusión de la vegetación dentro del sistema, contribuye en gran medida a la regulación de este balance, ya que como organismo vivo puede modificar los flujos de masa y energía, tanto de entrada como de salida del sistema, afectando el balance de manera global. En los sistemas bióticos, existen componentes añadidos en la formulación del balance energético abiótico que vienen dados por la energía consumida en los siguientes procesos:

---

## Transpiración

Es el proceso físico-biológico por el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso a través del metabolismo de las plantas y pasa a la atmósfera. Este fenómeno consiste en la pérdida de agua en forma de vapor que se produce en las plantas. A las hojas les llega gran cantidad de agua absorbida por las raíces, pero sólo una pequeña parte se utiliza en la fotosíntesis. El proceso de transpiración produce la presión que empuja al agua hacia arriba a todas las células de la planta. Su principal función es eliminar en forma de vapor el agua que no es utilizada por las plantas. Además, el agua transpirada permite el enfriamiento de la planta, debido al elevado calor de vaporización del agua (para evaporarse necesita consumir muchas calorías).

Esencialmente es el mismo proceso físico que la evaporación, excepto que la superficie desde la cual se escapan las moléculas del líquido no es de agua libre sino que es la superficie de las hojas que se componen por finas capas de células (mesodermo) y poseen una delgada epidermis de una célula de espesor, la cual posee numerosos estomas. El espacio intercelular en el mesodermo contiene grandes espacios de aire entre cada estoma. La humedad entre los espacios intercelulares se vaporiza y escapa de la hoja a través de estos estomas. El número de estomas por unidad de superficie varía dependiendo de la especie vegetal y las condiciones ambientales. Generalmente se abren con la luz y se cierran con la oscuridad. La temperatura afecta la velocidad de apertura. Contrariamente a lo que se cree, el control que ejercen los estomas sobre las tasas de transpiración es muy limitado. Ellos se cierran cuando la oscuridad o la marchitez comienzan. Cuando los estomas están completamente abiertos, la tasa de transpiración está determinada por los mismos factores que controlan la evaporación. Los estomas ejercen una suave regulación solamente cuando están cerrados.

---

## Evapotranspiración

La evapotranspiración es la combinación de los fenómenos de evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación. La dificultad de la medición en forma separada de ambos fenómenos (el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetal de la planta) obliga a introducir el concepto de evapotranspiración como pérdida conjunta de un sistema determinado. Thornthwaite, introdujo un nuevo concepto optimizando ambos, es la llamada evapotranspiración

potencial o pérdidas por evapotranspiración, en el doble supuesto de un desarrollo vegetal óptimo y una capacidad de campo permanentemente completa (Thornthwaite, 1948). Este autor designa así a la altura de agua que sería efectivamente evaporada si los recursos de agua que se pueden movilizar en la cuenca fueran en cada instante por lo menos iguales a los que pueden ser transformados en vapor por el juego de los factores hidrometeorológicos<sup>6</sup> y la vegetación. La cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración se conoce con el nombre de evapotranspiración real. Ésta es la suma de las cantidades de vapor de agua evaporada por el suelo y transpirada por las plantas durante un período determinado medidas en las condiciones meteorológicas y de humedad de suelo existentes. El principal factor que determina la evapotranspiración real es la humedad del suelo, el cual puede retener agua conforme a la capacidad de retención específica de cada tipo de terreno. La humedad del suelo es generalmente alimentada por la infiltración, y constituye una reserva de agua a ser consumida por la evaporación del suelo y las plantas.

Comparativamente, la capa vegetal evapora más agua que el sustrato por sí solo. Esto se debe a que el área expuesta es entre 20 y 40 veces la superficie de sustrato por el componente superficial de las hojas, que multiplican el área de intercambio, y el agua evaporada es proporcional al área expuesta en ausencia de viento. Una superficie cubierta por vegetación puede disipar 3 KWh/m<sup>2</sup> de energía por medio de evapo-transpiración durante un día soleado en verano, lo que supone un 20% de la energía absorbida solar total por las plantas durante ese periodo de tiempo (Britto-Correa, 2002); (Krusche, 1982).

La energía disipada por las plantas durante el proceso de evapo-transpiración hace que la temperatura en la capa vegetal se vea reducida, lo que, en el caso de las cubiertas ajardinadas, resulta en reducciones potenciales entre la temperatura superficial de una cubierta convencional y una cubierta ajardinada de más de 15°C (Britto-Correa, 2002).

---

<sup>6</sup> Componentes del ciclo hidrológico

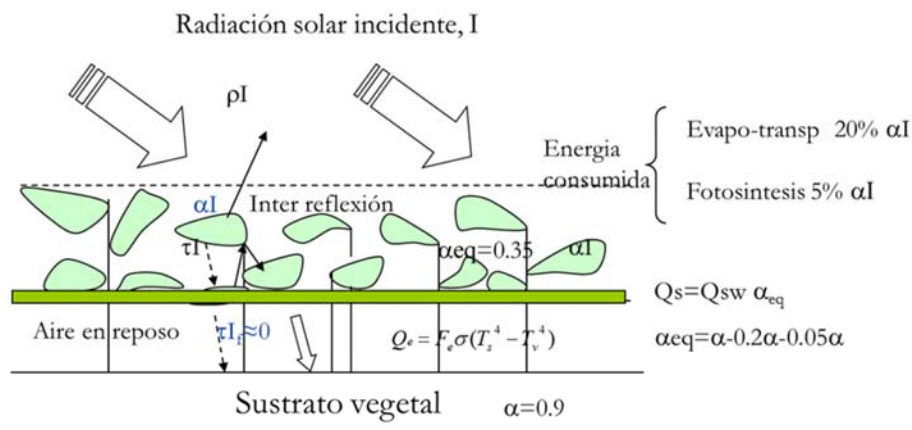
---

### Fotosíntesis y procesos metabólicos

Otros procesos específicos de la capa vegetal en los cuales se consumen grandes cantidades de energía son la fotosíntesis y los procesos metabólicos de producción de nutrientes e intercambios de  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$  en las plantas. Se puede considerar que alrededor de un 5% de toda la energía consumida por la planta se consume durante la respiración y fotosíntesis. Este porcentaje depende de las características físicas y ópticas de las diferentes especies vegetales (Britto-Correa, 2002).

El resultado final de los procesos explicados previamente es que parte de la energía solar recibida es reflejada por las hojas, y otra parte absorbida y consumida durante los procesos metabólicos de las plantas, el resto se transmite al sustrato y al aire circundante incrementando su temperatura. Como esta energía transmitida resulta ser una pequeña fracción resultante de los procesos previamente mencionados, no hay suficiente energía para aumentar substancialmente la temperatura del sustrato, por lo que la temperatura de los sistemas ajardinados permanece cercana a la del aire.

La imagen siguiente presenta los factores que determinan el balance energético de un sistema de cubierta vegetal.



$R_n$ : Radiación solar  
 $Q_{ri}$ : Energía reflejada  
 $Q_e$ : Energía emitida  
 $Q_{cv}$ : Energía convección

Figura 9 Componentes del balance energético de una cubierta vegetal. Fuente: Elaboración propia

Los procesos explicados, dependen de un parámetro principal característico de cada especie, la densidad foliar caracterizada por el Leaf Area Density ( LAD).

### 6.2.5 BALANCE ENERGÉTICO

A nivel global, el balance energético en el entorno urbano viene dado por la siguiente fórmula (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927):

$$S+B+L+V=0$$

Donde  $S$ , es la energía neta recibida,  $B$ , es la cantidad de energía que fluye del suelo (dependiendo de las temperaturas del suelo),  $L$  el flujo que viene de la atmosfera, y  $V$  la energía consumida en los procesos de evaporación.

En un sistema urbano con elementos vegetales, a este balance hay que añadirle los componentes bióticos, la evapo-transpiración y los procesos metabólicos, que alteran el balance energético disminuyendo la energía del sistema. De este modo el balance energético anterior podemos presentarlo como:

$$\text{ENTRADA} - \text{SALIDA} - \text{ALMACENAMIENTO} - \text{ENERGÍA CONSUMIDA} = 0$$

La siguiente figura ilustra los fenómenos que definen el balance energético en un sistema natural:

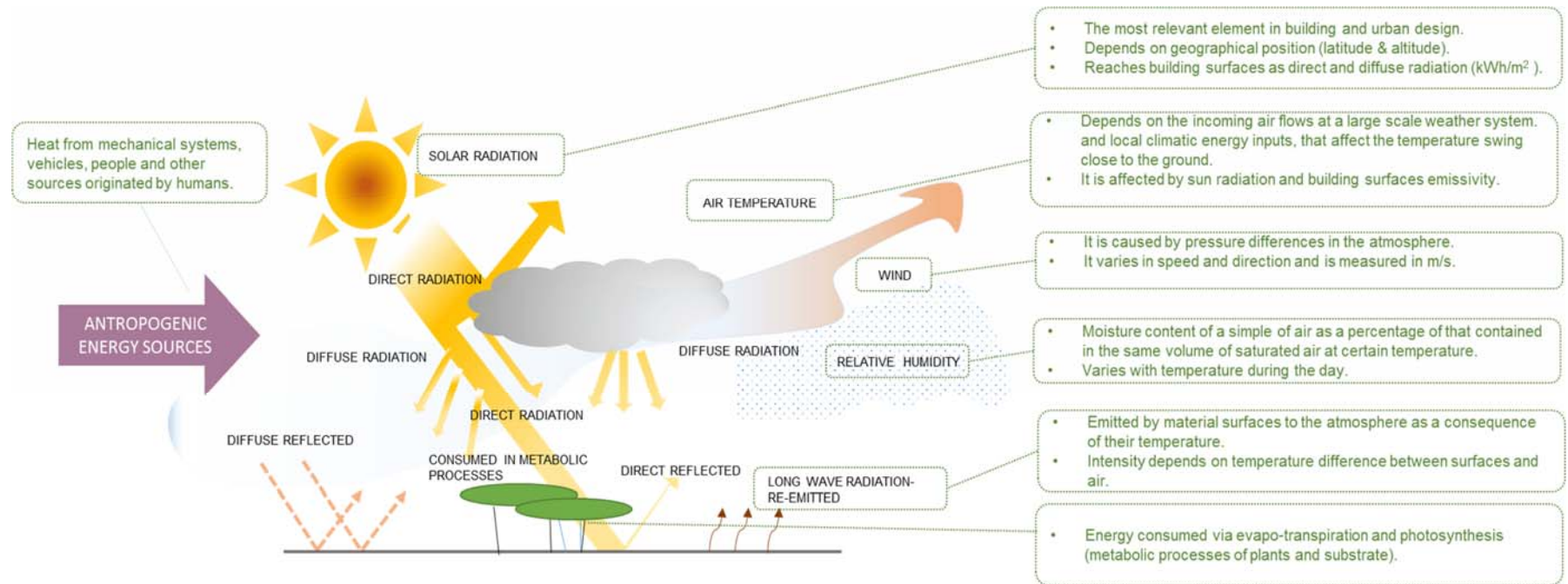




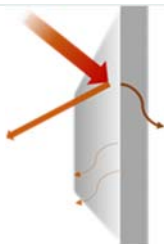
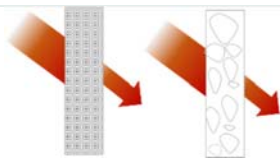
Figura 10 Factores que definen el microclima. Fuente: Elaboración propia




## 6.2.6 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS

Como se ha expuesto en las secciones previas, el resultado del balance energético en el entorno urbano se traduce en unas condiciones específicas de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa que condicionan el confort térmico y los perfiles de temperaturas y humedad alrededor de los edificios. La tabla siguiente resume los aspectos más relevantes para el estudio de los microclimas:

Tabla 4 Parámetros clave en microclimas urbanos

AIRE	<b>Airflow movement</b>	Warm air is less dense and rises while cold air is denser and moves downward displacing warm air.	
	<b>Evaporation</b>	Evaporation uses energy to change from a liquid to gaseous state and thus removes heat. Dry air absorbs water increasing its humidity and decreasing its temperature.	
MASA	<b>Surface properties:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Absorptance</li> <li>• Reflectance</li> <li>• Emittance</li> </ul>	Light colours reflect solar radiation, while dark colours absorb it. The type of material should also be considered as they vary in emittance potential. Both properties are combined into a metric of solar reflectance index (SRI) and in hot climates should be as high as possible.	
	<b>Porosity</b>	Trapped air reduces heat transfer. A material containing air gaps is an insulator and reduces conductive transfer.	

	<b>Thermal inertia</b>	It is the capacity for storing energy. Dense materials can store more thermal energy releasing it when temperatures drop.	
--	------------------------	---	---

Los principales parámetros climáticos que influyen los aspectos anteriores son los siguientes:

Tabla 5 Parámetros que afectan el microclima

Parámetro climático	Unidades
Air temperature ( $T^a$ )	°C
Solar radiation ( direct and diffuse)	kWh/m <sup>2</sup>
Sun angle	A (°)
Relative humidity (RH)	%
Wind speed and direction	m/s, (°)
Precipitation	mm

La percepción humana de estos parámetros microclimático está afectada por el efecto combinado de estos factores, que definen la sensación térmica. Especialmente la humedad, es un factor crítico en la evaluación de confort térmico ya que los niveles altos de humedad reducen la capacidad del cuerpo para regular la temperatura mediante los procesos de evapotranspiración de la piel.

De los parámetros climáticos anteriores, esta investigación se centra en la temperatura del aire y la humedad relativa.

---

## 6.2.7 FACTORES MORFOLÓGICOS

---

### Geometría: El cañón urbano

La escala y configuración de estudio seleccionada, el microclima de la geometría de calle, morfológicamente responde a una configuración tipo “cañón” que en su forma más simple se define como un canal rectangular (altura  $H$ , anchura  $W$ ) flanqueado por edificios y delimitado por la superficie horizontal de suelo y los paramentos verticales de los edificios, pero que permanece abierta al exterior. Idealmente un cañón es una calle relativamente estrecha con edificios altos que crean fachadas continuas a ambos lados de la calle. Pero este término se amplía a otras configuraciones que se caracterizan de acuerdo de su geometría. El elemento más importante de un cañón es el cociente de la altura de los edificios que lo flanquean ( $H$ ) y el ancho de la calle ( $W$ ),  $H/W$ , que se define como la relación de aspecto, y no sus dimensiones absolutas (Arnfield, 1990).

El valor de la relación de aspecto puede utilizarse para clasificar los siguientes cañones calle (Vardoulakis, Fisher, Pericleous, & Gonzalez-Flesca, 2003):

Cañón regular –  $H/W \sim 1$  (con aperturas en las fachadas de dimensiones medias).

Avenida cañón –  $H/W < 0.5$

Cañón profundo -  $\sim \geq 2$

Puede hacerse una sub-clasificación de cada una de las tipologías anteriores dependiendo de la distancia entre dos intersecciones principales a lo largo de la calle; definiendo la longitud del tramo de calle como  $L$ .

Cañón corto -  $L/H \sim 3$

Cañón medio -  $L/H \sim 5$

Cañón largo -  $L/H \sim 7$ .

Otros factores, como la simetría, o la altura de los bloques a cada lado de la calle en función de la dirección del viento, generan clasificaciones adicionales. Todos estos factores influyen las características de la capa límite atmosférica generada por la presencia de estas geometrías, el acceso de la radiación solar y el comportamiento del viento y configuran un volumen de aire con

unas características singulares que recibe el nombre de cañón urbano (Oke T. , 1988) . El cañón urbano altera las condiciones climáticas locales, incluyendo temperatura, viento y calidad del aire.

Los fenómenos micrometeorológicos que ocurren en este volumen confinado han sido objeto de numerosos análisis en relación a su comportamiento climático (Nunez & Oke, 1977) (Oke T. , 1988) (Dessí, 2007) (Higueras E. , 2006), (Cordero, 2014), (Nakamura & Oke, 1988) y concluyen que las condiciones climáticas en un cierto punto del cañón urbano son determinadas principalmente por la naturaleza de su entorno inmediato, en particular la morfología urbana, las propiedades de los materiales superficiales que lo confinan, la vegetación, y las actividades humanas que en él se realicen. Dichas alteraciones no solamente se producen espacialmente, sino también a lo largo del tiempo (Taha H. , 1997).

Otros factores que condicionan su comportamiento son la orientación y factor de vista del cielo conocido por su denominación inglesa, Sky View Factor, SVF (Cordero, 2014). El factor de vista (SVF) indica la relación entre la radiación recibida por una superficie plana y la emitida por el hemisferio completo (Watson & Johnson, 1987), (Gal, Rzepa, Gromek, & Unger, 2007), y se calcula como la fracción de cielo visible cuando se mira desde la tierra hacia arriba según la fórmula:

$$SVF = \frac{[1 + \cos(\tau)]}{2} = \cos^2\left(\frac{\tau}{2}\right)$$

SVF es un valor referido a un punto de observación específico y da una medida de la apertura del cielo al transporte radioactivo. El resultado es un ángulo sólido, expresado como un valor adimensional que varía de 0 a 1 (Rakovec & Zaksek, 2012). Un SVF de 1 indica que el cielo es completamente visible; por ejemplo, en un terreno plano. En entornos urbanos o forestales, el SVF se ve reducido. (Nunez & Oke, 1977).

Actualmente el SVF se puede obtener por medio del uso de cámaras de ojo de pez, que simplifican la obtención del SVF y del H/W por medio de fotografía digital. (Grimmond, Potter, Zutter, & Souch, 2001).

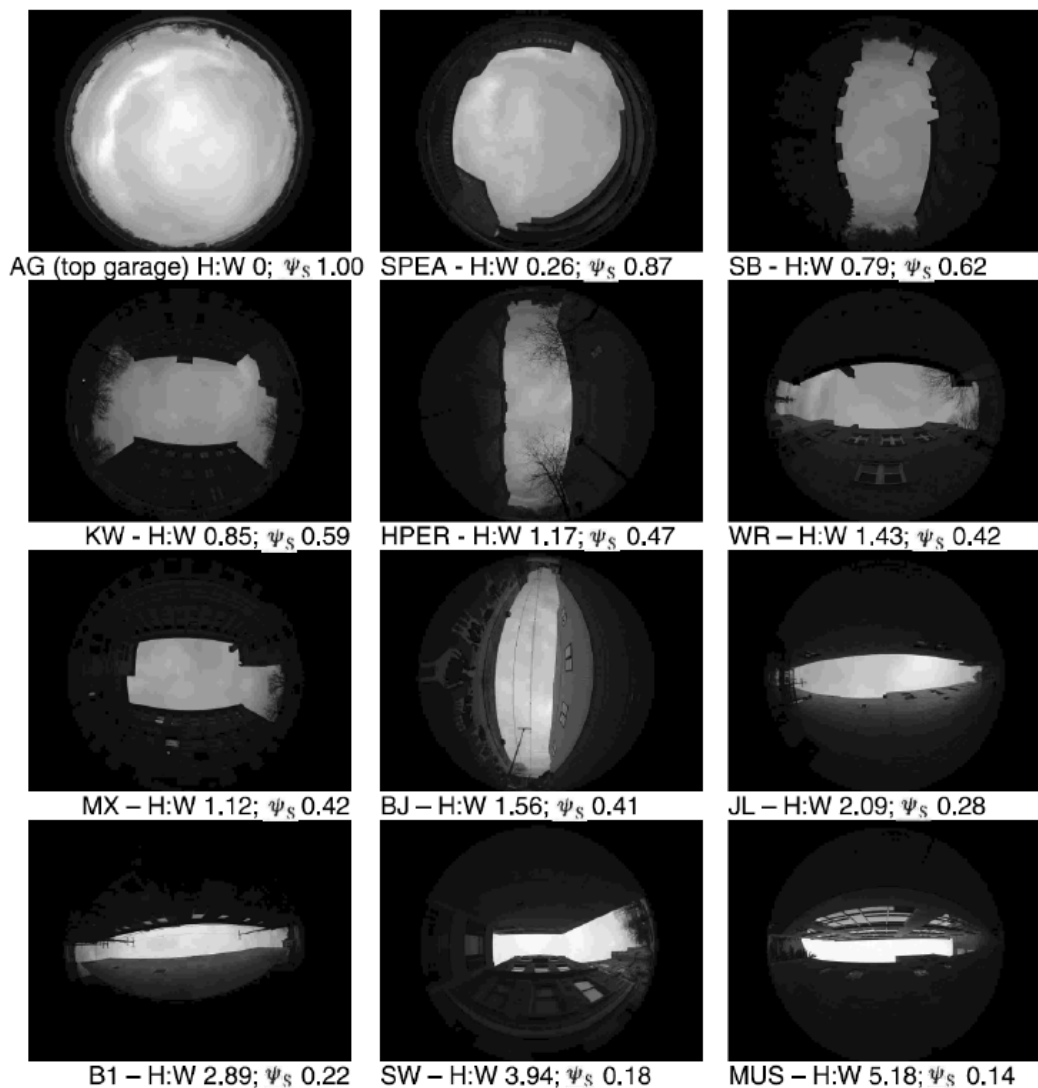


Figura 11 Fotografía de ojo de pez hemisférica para determinar el sky view factor Fuente: Rapid methods to estimate sky view factors applied to urban areas. (Grimmond, Potter, Zutter, & Souch).

Tanto la orientación, como el SVF influyen directamente la radiación solar que alcanza las superficies que confinan el cañón, y por tanto su absorción y emisión térmica así como el régimen de vientos (dirección y velocidad) que se ven alterados no solo por la geometría del cañón, sino también por las temperaturas superficiales. En general las tres variables indicadas, radio de aspecto, orientación y SVF, tienen un impacto muy significativo sobre las variables climáticas que intervienen en el balance energético del cuerpo humano y el ambiente, determinando la sensación térmica en el cañón.

Tabla 6 Factores determinantes del cañón urbano. Fuente: Elaboración propia

FACTORES DETERMINANTES DEL CAÑÓN URBANO	
<b>Radio de Aspecto</b>	
<b>Orientación</b>	
<b>Factor de vista de cielo (svf)</b>	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">   </div> <div style="text-align: center;">   </div> </div>

## Propiedades superficiales

El rol de los materiales del pavimento y fachadas de los edificios dentro de un cañón urbano es un aspecto decisivo sobre las ganancias térmicas y el sobrecalentamiento en las zonas urbanas. Los materiales expuestos a la radiación, convierten la radiación solar recibida en calor, que en parte se acumula y otra parte se re-emite hacia la atmósfera en función de las características físicas del material, especialmente de su albedo, que representa el ratio entre la cantidad de radiación solar que incide en el material y la que refleja. Las superficies claras tienen valores de albedo superiores a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la Tierra es del 37-39% de la radiación que proviene del Sol.

Las investigaciones muestran que la alta capacidad térmica y absorción de los materiales sumada a la gran extensión de superficie expuesta, son significativas en el aumento de la temperatura en las ciudades. (Santamouris M. , 2001), (Nunez & Oke, 1977).

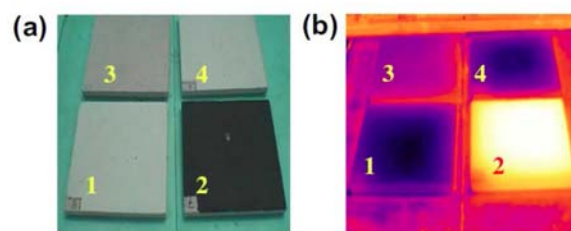


Figura 12 Imagen visible (a) e infrarroja (b) de cuatro baldosas de diferentes colores. 1 y 4 pintadas de blanco, 3 no pintada y 2 de negro. (Santamouris M. , Using Cool Paving Materials to Improve Microclimate in Urban Areas. Design-Realization and Results on the Flisvos Project, 2012).

---

## Viento

Los flujos de viento en los espacios dentro de una trama urbana, como es el caso de una plaza o calle, presentan variaciones muy significativas en función de la geometría del entorno. Cuando la dirección del viento a nivel de cubierta es paralela a la calle, se produce un efecto de canalización donde los vientos se ven conducidos y acelerados por el cañón. En situaciones donde el ancho de

calle es no uniforme incrementando aún más la aceleración de los vientos (Spirn, 1986). Ambos estos efectos se explican por el principio de Bernoulli. El flujo de viento varía significativamente diferente para cañones cortos y largos, ya que los vórtices de la esquina tienen una influencia más fuerte en los cañones cortos (Kastner-Klein, Fedorovich, & Rotach, 2001).

Cuando la dirección del viento a nivel de techo es perpendicular a la calle, se crea un flujo de viento giratorio vertical con un vórtice primario centrado dentro del cañón. En función de la relación de aspecto  $H/W$ , se definen los regímenes de flujo. En el orden creciente de proporción de aspecto de estos regímenes de flujo son: *aislado*, *en estela interferida*, y *en vórtice* (Lipp, 2014), (Oke T. , 1988) . El número total de vórtices y su intensidad depende de muchos factores. Estudios con modelos numéricos realizados para cañones urbanos aislados han demostrado que el número de vórtices que se forman aumenta con el incremento de la relación  $H/W$  (Kim & Baik, 1999).

Para el caso de la estructura de calle con viento perpendicular a la dirección principal de la calle, Oke realizó estudios para poder dar aproximaciones y generar una casuística de régimen de viento en función de los parámetros geométricos de la calle (ancho de calle,  $W$ , alto de edificios  $H$  y largo de calle,  $L$ ) y el régimen de viento por encima del nivel de los edificios que la configuran (Oke T. , 1988). Los resultados de mediciones indicaban que si los límites del sistema están suficientemente separados ( $H/W > 0,05$ ) los campos de flujo del viento no interactúan (Oke T. , 1988), no dándose ninguna variación en el espacio entre los edificios y por tanto, este es el “*flujo aislado*”. Sin embargo, en espacios más angostos, existe un régimen de transición donde las estelas de un edificio interfieren con las del otro, creándose vórtices secundarios y turbulencias como se muestra en el caso b. de la ilustración siguiente, el flujo en “*estela interferida*”.



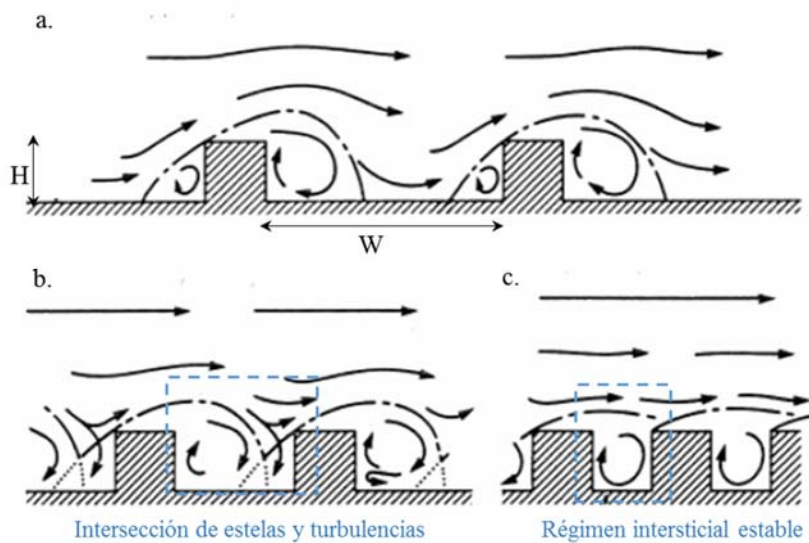


Figura 13 Flujos de aire asociados a geometrías urbanas: a.  $H/W < 0.5$ , b.  $H/W < 1$ , c.  $H/W > 1$ . Fuente: Ilustración adaptada desde Oke (Oke T. , 1988).

Para secciones aún más angostas, con  $H/W \geq 1$ , se establecen regímenes circulatorios estables en cada celda, el flujo en "vórtice". Hay una tendencia hacia un flujo superficial, donde la masa de viento no entra en la celda (ilustración 13, c.). No obstante, DePaul y Sheih sugieren que la velocidad del viento de mínima necesaria para producir un vórtice es sobre 1,2 m/s (Depaul & Sheih, 1986).

En estos casos con perpendicular a la dirección principal de la calle, principalmente a nivel de la calle, en cada extremo del cañón, se hacen remolinos de esquina/extremo horizontales giratorios. El alcance horizontal de estos vórtices de esquina difiere en cada extremo de un cañón y esto lleva patrones complejos eólicos a nivel superficial en las intersecciones de calles. Experimentos de campo han demostrado además que los vórtices de esquina pueden extenderse en toda la profundidad del cañón pero variando su extensión horizontal en su altura (Pol & M.Brown, 2008).

Las proporciones del sistema también afectan la velocidad del viento. Por ejemplo, para espacios con proporción  $L/D \geq 1$ , cuando la dirección del viento es normal a L, se observa una disminución de la velocidad en el centro de ésta, en relación con la que se puede medir en el tejado de los edificios circundantes. En cambio, si el viento corre paralelo al eje mayor, la velocidad de éste

puede ser igual o incluso mayor que en nivel de tejados, denominado “urban canopy” (para  $L/D > 2$ ) (Ochoa J. M., 1999).

Otros factores que influyen sobre la fuerza de los flujos de recirculación son las turbulencias inducidas por las geometrías de los tejados. Estudios con modelos físicos en túnel de viento han demostrado que con cubiertas planas la turbulencia en la parte baja del cañón aumenta y que con cubiertas inclinadas en alguno de los flancos del cañón cambia la zona principal donde se generan las turbulencias hacia abajo y se reduce la y redujo la intensidad de la recirculación de aire dentro del cañón (Kastner-Klein, P, Berkowicz, & Britter, 2004).

Los resultados mencionados son para situaciones sin incluir los efectos de calentamiento superficial de las fachadas. Estudios con modelos numéricos han demostrado que, cuando una superficie en un cañón urbano se calienta, cambian las características del flujo del vórtice. Las variaciones en las temperaturas de diferentes superficies según su orientación afectan el flujo del vórtice (Kim & Baik, 1999).

La transición entre los tres tipos de flujos se da con una combinación de  $H/W$  y  $L/H$  (donde  $L$  es la longitud del espacio normal a la dirección del viento). En la figura siguiente se aprecia cómo se dan los cambios entre diferentes flujos, según la geometría.

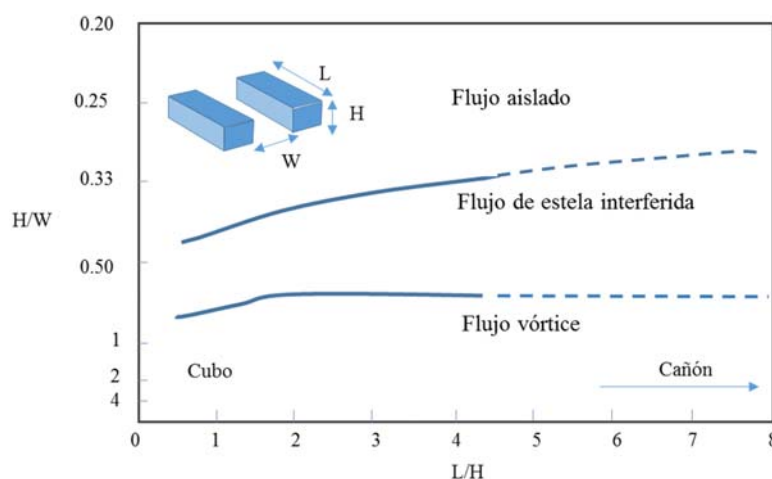


Figura 14 Límite entre los tres tipos de régimen de flujo en función de  $H/W$  y  $L/H$  según resultados de túnel de viento. Fuente: Adaptación (Oke T. , 1988)

La estimación de la velocidad del aire dentro de un cañón urbano ha sido objeto de numerosas investigaciones, Nakamura y Oke consideran que el flujo de aire en el cañón tiene que ser visto como una característica secundaria de la circulación del viento que es impulsada por el flujo ambiente. Si la velocidad del viento fuera del cañón está por debajo de cierto valor umbral se pierde el acoplamiento entre el flujo superior y secundario, (Nakamura & Oke, 1988) y la relación entre la velocidad del viento por encima del techo y en el techo del cañón se dispersa. Los efectos de límite de los cañones juegan un papel importante en la distribución de flujo de aire en su interior. Para cañones con  $L/W \approx 20$  Yamartino y Wiegand concluyeron que, los efectos de extremo en un cañón empiezan a dominar en el régimen de vórtice (Yamartino & Wiegand, 1986). Fenómenos semejantes fueron reportados en otro estudio similar (Santamouris, Papanikolaou, Koronakis, Livada, & Assimakopoulos, 1999). Así la predicción del flujo de aire en los cañones con una relación de aspecto altura se limita a los casos donde el efecto de extremo del cañón no domina el flujo.

El caso que aplica a esta investigación se centra en geometrías de calle urbana con una relación de aspecto  $H/W \sim 1$  con una relación  $L/H > 6$ , lo que la clasifica como cañón urbano. Para este caso, el régimen que aplica es el de vórtex.

---

### 6.2.8 FACTORES ANTROPOGÉNICOS

Biológicamente, todos los organismos emiten el calor residual que procede de sus procesos metabólicos, del mismo modo, cualquier mecanismo que realiza un trabajo o proceso que use energía, por ejemplo los refrigeradores o un motor de combustión. Este calor se libera al ambiente incrementando su temperatura. Estos sistemas necesitan producir calor de rechazo como parte de su correcto funcionamiento y se cuantifica de acuerdo a las leyes de la termodinámica. Las fuentes de calor residual de origen antropogénico, incluyen toda clase de actividades humanas y mecanismos.

Esta producción de calor derivada de las actividades humanas es un contribuyente importante la isla de calor urbana en muchas ciudades. Un estudio reciente desarrolló un modelo energético a escala urbana (LUCY) que proporcionaba a cada hora estimaciones de los flujos de calor antropogénico (AH) a 2,5 minutos de arco escala alrededor del mundo (Allen, Lindberg, &

Grimmond, 2011), los resultados de este estudio mostraban cómo los flujos de AH son típicamente bajos en las zonas rurales, con picos localmente concentrados en zonas urbanas alcanzando valores de hasta  $20 \text{ W m}^{-2}$  durante la noche y hasta  $70 \text{ W m}^{-2}$  durante el día. Este tipo de calentamiento, puede afectar la temperatura del aire en el ámbito cercano a la superficie de calle y potencialmente jugar un papel en la formación de islas de calor urbanas en función de la magnitud de las fuentes de calor antropogénico tales como el uso energético por sistemas de clima, generación energética y sistemas de transporte. Estos resultados coinciden con los de otros análisis que mostraban diferentes valores de AH en diferentes ciudades del mundo (Taha H. , 1997), (Hosler & H.E. Landsberg, 1977). Sus resultados mostraban que en muchas grandes ciudades de Estados Unidos, el AH oscila entre 20 y  $40 \text{ W m}^{-2}$  en verano y entre 70 y  $210 \text{ W m}^{-2}$  en invierno.

Para los núcleos urbanos, Taha y otros examinaron patrones de uso de energía en edificios y vehículos de motor y desarrollando perfiles de calentamiento antropogénico diurno basado en calor de rechazo alrededor de estas fuentes (Taha., Akbari, Sailor, & D. R. Ritschard, 1992). Estos perfiles se usaron de base para parametrizar los sistemas antropogénicos en modelos predictivos meteorológicos para estimar el impacto del AH en las temperaturas del aire para los cálculos de climatización. Estas simulaciones meteorológicas mostraron que el AH, en un núcleo urbano grande puede incrementos de temperatura de hasta  $2\text{-}3^{\circ} \text{ C}$  durante el día y noche. Sin embargo, las simulaciones de Taha y otros en núcleos rurales y suburbanos mostraron que el AH tiene un impacto insignificante en la temperatura del aire. (Taha., Akbari, Sailor, & D. R. Ritschard, 1992)

Combinando los efectos del calentamiento antropogénico en centros de ciudad con los de otros factores, tales como ausencia de áreas vegetales y bajo albedo, provocan incrementos aún mayores de temperatura que pueden aumentar el efecto de isla de calor.

### 6.3 EL CONFORT TÉRMICO

A pesar de que esta investigación se centra en los parámetros de temperatura del aire y humedad relativa, dado que éstos influyen las condiciones de confort, se ha incluido esta sección a modo de referencia explicando las bases del confort térmico y los factores que lo determinan, que van más allá de los fenómenos físicos que determinan el microclima y que no son objeto de este estudio.

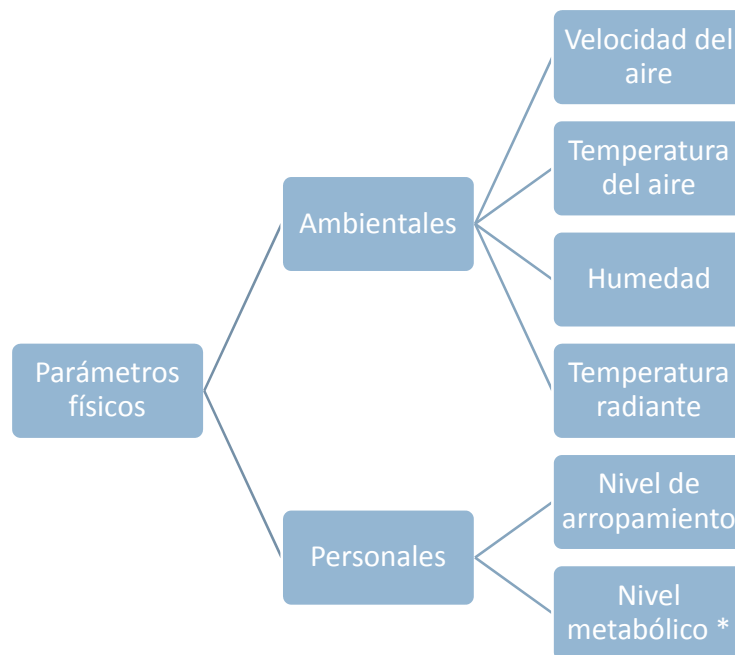
El confort térmico lo define el estándar ASHRAE 55-2004 como “la condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico y se valora teniendo en cuenta el componente subjetivo” (ASHRAE, 2013). Esta sensación de satisfacción se logra cuando el calor generado por el metabolismo humano se disipa manteniendo el equilibrio térmico con los alrededores.

Dentro del entorno construido, es muy difícil de definir el concepto de confort, puesto que hay un factor subjetivo por el que cada persona lo percibe de forma diferente. La complejidad de la definición y cuantificación de este concepto incrementa exponencialmente cuando se trabaja en entornos exteriores dada la dificultad para controlar los parámetros que lo determinan. La siguiente figura muestra los mecanismos que el cuerpo humano utiliza para alcanzar el equilibrio térmico.

La cuantificación del confort se realiza por medio de los índices, que integran el efecto combinado de la temperatura, radiación, viento y humedad. Uno de ellos es la *Temperatura Efectiva o Temperatura Efectiva Nueva*, definida como una temperatura representada por el efecto combinado de la temperatura ambiente, la humedad relativa y el movimiento del aire, en la sensación de calor o frío que percibe el cuerpo humano y que es equivalente a la temperatura del aire en reposo que produce un efecto idéntico. Para un entorno definido, se calcula como la temperatura seca del aire de un recinto similar al analizado, con un 50% de humedad relativa, velocidad del aire de unos 0,20 m/s y paramentos a la misma temperatura del aire, que produjera la misma sensación térmica que el recinto analizado, en las mismas condiciones de actividad y

vestimenta. Este índice engloba los parámetros de la temperatura resultante y la humedad relativa, no de la temperatura radiante, y se obtiene empíricamente sobre el diagrama psicrométrico

El confort depende de los siguientes factores físicos (ASHRAE, 2013):



\*El nivel metabólico (depende principalmente del género, la edad y la actividad)

Figura 15 Parámetros que condicionan el confort

### Factores ambientales:

#### Temperatura del aire

Es la temperatura del aire que rodea el cuerpo. Generalmente se mide en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

#### Temperatura radiante

Es el calor que irradia un objeto caliente. La temperatura radiante tiene una influencia mayor que la temperatura del aire en el balance energético de un cuerpo.

#### Velocidad del aire

Este factor describe la intensidad del movimiento del aire y contribuye a las pérdidas energéticas por convección además de aumentar la tasa de evapotranspiración de la piel. Su efecto se traduce en una sensación térmica de mayor frío incluso cuando no ha habido ningún cambio en la temperatura del aire.

### Humedad

Es el resultado del agua evaporada en el aire. La humedad relativa es el cociente entre la cantidad real de vapor de agua en el aire y la cantidad máxima de vapor de agua que el aire puede contener a esa temperatura de aire. La condición de humedad óptima para el confort se encuentra en un rango entre el 40% y 70% (ASHRAE, 2013). En ambientes con una humedad relativa alta, la evaporación del sudor, que es el principal método de reducción de calor corporal se dificulta, y por tanto, el cuerpo tiene mayores problemas en autorregular su temperatura.

### Factores personales:

#### Nivel de arropamiento

El Confort térmico depende del efecto aislante de la ropa de su usuario. Llevar demasiada ropa puede ser una causa primaria del estrés por calor incluso si el ambiente no se considera cálido. La ropa es una herramienta de control para facilitar la adaptación al clima. ASHRAE determina unos índices de aislamiento por arropamiento, que se define como la Resistencia a la transferencia de calor sensible que proporciona una indumentaria. Se expresa en unidades del clo.  $1 \text{ clo} = 0,155 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ . (ASHRAE, 2013).

#### Tasa metabólica

Cuanto mayor es la intensidad del trabajo físico que hacemos, mayor es el calor que producimos. Este hecho aumenta la necesidad de pérdida de calor para evitar el sobrecalentamiento. El impacto de la tasa metabólica en el confort térmico es crítico en el cálculo del confort térmico y está influenciado no sólo por la actividad, sino también por otras características físicas de una persona como su tamaño y peso, edad, sexo y nivel de condición física que pueden afectar a su sensación térmica respecto a otras personas en las mismas condiciones de temperatura y velocidad del aire y humedad.

Estos factores expuestos son los que tradicionalmente se han incluido en los cálculos de confort por ser cuantificables y fácilmente identificables. La imagen a continuación muestra los mecanismos de un humano para alcanzar el balance térmico en base a los parámetros físicos descritos.

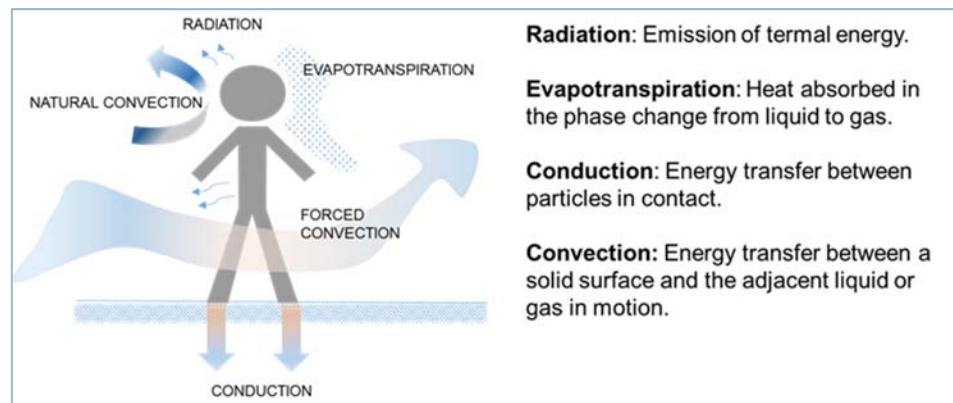


Figura 16 Mecanismos del balance térmico en humanos. Fuente: Elaboración propia

El estudio de las condiciones de confort térmico en espacios exteriores urbanos, ha arrojado algo de luz sobre la complejidad de las cuestiones involucradas, demostrando que un enfoque cuantitativo es insuficiente para describir condiciones de confort al aire libre. Estos estudios han revelado que aunque los parámetros microclimáticos son los principales factores que influyen en la sensación térmica, no representan por sí solos la amplia variación de la percepción de confort en el ser humano. Los parámetros ambientales que afectan el confort térmico al aire libre, aún en condiciones similares en el interior, se encuentran dentro de una gama mucho más amplia aún y son más variables. Por lo tanto, debido a esta complejidad, en cuanto a la variabilidad temporal y espacial, así como la gran variedad de actividades de personas se dedican a, ha habido muy pocos intentos de entender las condiciones de confort fuera. En mayoría de los estudios de confort térmico al aire libre, se ha utilizado un modelo puramente fisiológico, que implica un modelo matemático del sistema termorregulador empleado para el cálculo de las condiciones de confort térmico, mientras que las respuestas subjetivas no han sido consideradas. En este contexto, el factor psicológico está tomando cada vez mayor fuerza en la comprensión y análisis de esta variación de condiciones de confort (Nikolopoulou & Steemers, Thermal Comfort and Psychological



Adaptation as a Guide for Designing Urban Spaces, 2003). El estado psicológico de los habitantes de un núcleo urbano y su percepción del espacio juega un papel importante en la determinación de lo cómodo que se sienten en un ambiente. Factores como la indumentaria y la actividad realizada también afectan significativamente al concepto de confort en espacios abiertos.

No se puede olvidar que el ser humano, comparte la capacidad de los seres vivos de la adaptación. Este término puede definirse como la disminución gradual de la respuesta del organismo a la exposición repetida a un estímulo, e integra todos los cambios necesarios que hacen que un ser humano esté mejor adaptado para sobrevivir en ese entorno. En el contexto de confort térmico, incluye todos los procesos por los que la persona mejora su ajuste entre el entorno y sus necesidades. El proceso de adaptación incluye todas las facetas del ser humano: física, fisiológica y psicológica (Nikolopoulou, Baker, & Steemers, 1999).

### **Adaptación física**

Implica todos los cambios que hace que una persona, con el fin de ajustarse con el medio ambiente, o alterarlo de acuerdo a sus necesidades, reactiva o interactivamente. En la adaptación reactiva, los únicos cambios que se producen son personales, como el cambio de ropa, postura o posición. En la adaptación interactiva sin embargo, las personas realizan cambios en el medio ambiente con el fin de mejorar sus condiciones de confort, como la apertura de una ventana.

### **Adaptación fisiológica**

La adaptación fisiológica implica cambios en las respuestas fisiológicas resultantes de la exposición repetida a un estímulo y conduce a una tensión de disminución gradual de dicha exposición (Nikolopoulou, Baker, & Steemers, 1999). En el contexto del ambiente térmico, esto se llama aclimatación fisiológica. Este mecanismo se vuelve crucial en ambientes extremos, pero en el contexto de los microclimas urbanos no es apreciable de acuerdo a las investigaciones llevadas a cabo por Nikopoulou (Nikolopoulou, Spyros, & Kikira, 1999), (Nikolopoulou & Steemers, 2003), (Nikolopoulou, Baker, & Steemers, 1999). De acuerdo a sus estudios basados en análisis de campo en diferentes grupos de población en distintos climas, los habitantes de un clima determinado, no perciben el frío o el calor como un factor de no confort porque lo entienden como parte de su experiencia vital en esa geografía concreta.

### Adaptación psicológica

Las personas perciben el ambiente de una manera diferente y su respuesta a un mismo estímulo físico no está en relación directa con su magnitud si no que depende de la información que tienen las personas para una situación particular. Los factores psicológicos, por tanto, influyen en la percepción térmica de un espacio y sus cambios de acuerdo a los siguientes factores.

### Naturalidad del entorno

Este es un término que describe un ambiente libre de la artificialidad, entornos naturales en que se ha comprobado que la gente presenta una mayor tolerancia a cambios en el entorno físico (siempre que se produzcan naturalmente) y una aceptación mayor a un rango más amplio de condiciones de confort (Griffiths, Huber, & Baillie, 1987). El mejor ejemplo que este es un parámetro importante en la percepción del confort en espacios al aire libre tal vez destaca en la figura 9, que refleja los resultados de la investigación de Nikopoulou (Nikolopoulou, Baker, & Steemers, 1999) que muestra la comparativa entre los índices de porcentaje de personas insatisfechas (PPD) de acuerdo a la metodología de ASHRAE 55 predicted mean vote ( PMV), con las respuestas reales obtenidas de los diferentes grupos de población entrevistados.

En lugares donde naturalmente se producen los cambios climáticos, los cambios en las condiciones de confort en el entorno físico natural son mejor tolerados.

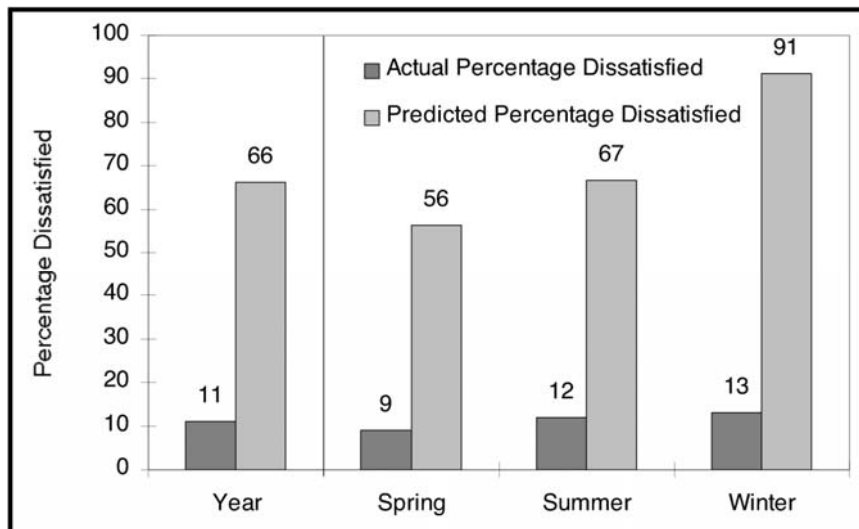


Figura 17 comparativa entre resultados de PPD teóricos con los reales. Fuente: (Nikolopoulou, Baker, & Steemers, Thermal Comfort in Urban Space: Different Forms of Adaptation, 1999)

### Expectativas

Las expectativas de las personas en cuanto a lo que debería ser el medio ambiente influye mucho en la percepción de las personas cuando se experimenta la realidad del espacio. En los espacios al aire libre los cambios microclimáticos son aceptables incluso cuando generan unas condiciones de confort térmico bajo, porque es lo esperado o típico para una época del año, sin embargo, cuando las condiciones térmicas varían de las condiciones experimentadas en un plazo de tiempo corto, la percepción cambia y la insatisfacción aumenta. Estas expectativas se basan en la experiencia previa, y puede distinguirse entre corto y a largo plazo. Experiencia de corto plazo está relacionada con la memoria y parece ser responsable de los cambios en las expectativas de la gente de un día al siguiente en cambio, la experiencia a largo plazo se relaciona con los esquemas que las personas han construido en sus mentes y determina una opción de acción bajo diferentes circunstancias. Por lo tanto cambios en la ropa, consumo de bebidas frías para alterar el calor metabólico, pasando de sol a sombra, etc., todos representan bien adquiridos opciones de acción sobre la cuestión de cómo lidiar con el ambiente térmico variable y son aceptables dentro de la percepción de confort.

### Tiempo de exposición

La exposición a molestias no es vista negativamente si el individuo anticipa que es de corta duración, tales como salir de un coche caliente al entrar en un edificio en invierno y no es significativa la insatisfacción causada. Este es un factor crítico para espacios exteriores, que aparte de movimiento, se utilizan principalmente para actividades recreativas, y la gente puede modificar el tiempo que pasan fuera, según sus necesidades.

### Capacidad de control

ASHRAE 55 reconoce que las personas que tienen un alto grado de control sobre sus condiciones de confort, tolera un rango de variaciones más amplio, con la consecuente reducción de las respuestas emocionales negativas. El ambiente exterior ofrece al ocupante la posibilidad de controlar su propia posición, lo que, cuando ocurre, reduce el porcentaje de insatisfacción.

Todos estos factores y mecanismos de adaptación, favorecen la implementación de estrategias que posibiliten la reducción de condiciones extremas y extiende el periodo de tiempo en el que la capacidad de confort adaptativo resulta en unas condiciones de confort más amplias, haciendo la ciudad más vivible.

A pesar de la relevancia del confort térmico en el ámbito de estudio, no se ha sido objeto de esta investigación, que se centra en los parámetros ambientales que influirían en el mismo. El análisis del confort es una línea de investigación que queda abierta para futuros trabajos en línea con el desarrollo de esta tesis.

## 7. INFLUENCIA DE LOS SISTEMAS VEGETALES EN EL BALANCE ENERGÉTICO DEL CAÑÓN URBANO

Los estudios que analizan la relación de la vegetación con el medio construido se remontan a la segunda mitad del sXX, con un peso muy importante en los años 70s a raíz de la crisis energética y el auge de la arquitectura bioclimática, etapa en la que se empezó a considerar a la vegetación como una estrategia de conservación energética. Hoy en día, se suma la problemática del cambio climático y la calidad del aire que le han dado un nuevo giro a la investigación de las estrategias de naturalización urbana como elementos de adaptación climática.

Como se ha expuesto previamente, la presencia de sistemas vegetales en las ciudades, altera el balance energético del microclima urbano introduciendo cambios en la proporción de radiación solar que incide en las superficies, modificando la velocidad y dirección del viento, y ocasionando variaciones de la temperatura ambiente y la humedad relativa del aire. Aunque su efecto es limitado y está condicionado por su naturaleza orgánica cambiante, por el tipo de vegetación seleccionada y como se introduce en la trama urbana, se ha demostrado que contribuye a mejorar la sensación de confort en los espacios exteriores urbanos y a suavizar el impacto de los elementos climáticos sobre los edificios y por ende sobre los sistemas urbanos.

Una gran parte de la literatura relacionada con sistemas vegetales en entornos urbanos, se centra en la mesoescala, a nivel ciudad, como relacionados con la isla de calor urbana y gestión de escorrentías, o en la escala individual de edificio, como los que se refieren al impacto de los sistemas vegetales integrados en la piel del edificio en el comportamiento energético del mismo.

Autores como (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927) y (Oke T. R., 1990) sientan las bases para el estudio del microclima desde su faceta más conceptual, otros, como G. O. Robinette (1983) (21), (Alessandro, Barbera, & Silvestrini, 1987) o (Lowry, 1991) están más dirigidos al campo de la arquitectura y el urbanismo, ofreciendo un "estado del arte" en lo que a este tema se refiere. En una línea más pragmática, (Akbari & J.Huang, 1992) o (Brown &

Gillespie, 1995) , (Ochoa de la Torre & Serra Florensa, 1999), (Higueras E. , 1998), (Erell, Pearlmutter, & Williamson, 2011), dan una serie de recomendaciones sobre el uso de la vegetación para el control microclimático.

Mucha de la literatura analizada se centra en el desarrollo de modelos físicos y metodologías para simular y resolver el balance de radiación para diferentes geometrías y se centran especialmente en el cañón urbano (Arnfield, 1990), (Bruse & Fleer, Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. , 1998) , (Robitu, Inard, Groleau, & Musy, 2004). Entre éstas, una muy relevante fue la desarrollada por (Guerra M., D.S., J.L., & R., 1994) donde se dan una serie de pautas de diseño muy precisas para el acondicionamiento climático de espacios exteriores, haciendo énfasis en el uso de la vegetación. Lamentablemente no incluye ninguna metodología de cálculo para estimar el resultado de tales intervenciones.

En los últimos años, varios estudios han sido desarrollados que se inician en la cuantificación de estrategias específicas en diferentes climas, (Peng & Jim, 2013), (Onomura, Grimmond, Lindberg, Holmer, & Thorsson, 2015), lo que revela un interés cada vez más creciente por el paso de la definición de modelos a la cuantificación con el fin de establecer el vínculo con el diseño urbano, proporcionando métricas que sirvan de guía para la toma de decisiones de diseño. Esto exige un estudio particularizado de los efectos de las diferentes estrategias vegetales en cada clima y condición urbana. Esta investigación, tiene como objetivo aportar una valoración cuantitativa del efecto de la estrategia de naturalización de cubierta en el clima de Madrid y en un contexto urbano de densidad media.

Las siguientes secciones muestran las conclusiones más relevantes de los estudios precedentes relacionados con el impacto de la vegetación (y en detalle las cubiertas ajardinadas) sobre los diferentes factores que definen el microclima urbano en la estructura urbana de calle; radiación, viento, temperaturas y humedad, fuentes antropogénicas y el balance energético global del microclima afectado.

## 7.1 EFECTO DE LA VEGETACION SOBRE LA RADIACIÓN SOLAR

Históricamente, la vegetación se ha usado dentro del entorno urbano como elemento de sombreado y decoración. Su efecto directo es el control de la radiación solar por obstrucción, sin embargo, la vegetación, como sistema biótico, interactúa con la radiación solar de un modo que no es tan directo. La vegetación usa la energía del sol para sus funciones metabólicas. Del 100% de la energía solar incidente, las plantas absorben durante el proceso de la fotosíntesis aproximadamente el 5-20%, reflejan 5-20%, disipan por evapotranspiración 20-40%, emiten 10-15% y transmiten el 5-30% (Bansal, 1994).

Las siguientes secciones explican los mecanismos de transmisión de calor en la vegetación y los parámetros físicos clave en el modo en el que el medio físico interacciona con la radiación solar.

---

### 7.1.2 TRANSMITANCIA, ABSORPTANCIA Y REFLECTANCIA

La proporción en que las plantas absorben, reflejan, transmiten y metabolizan la energía solar depende en gran medida de la longitud de onda del espectro de la radiación que les llega. Aunque la capacidad de absorción, reflexión y transmisión de las plantas depende de su grosor, contenido de agua, edad, morfología y orientación, hay estudios que analizan los coeficientes promedio de reflexión, absorción y transmisión de una hoja verde para diferentes longitudes de onda, (Oke T. R., 1990) concluyendo que en el espectro visible, la transmitancia de los árboles es sensiblemente menor a la del total del espectro de la radiación solar. Esto se debe a que las plantas en general están especialmente preparadas para absorber la parte visible del espectro solar (entre 0,35 y 0,75  $\mu\text{m}$ ), que es la más abundante, para utilizarla en la fotosíntesis. Según (Brown & Gillespie, 1995) del total de la radiación visible, solamente 10% es reflejada y 10% es transmitida a través de las hojas. En el espectro infrarrojo, cerca del 30% es transmitida, 40% reflejada y solo 20% absorbida. Esta es la razón por la que aunque se esté bajo la sombra de un árbol, recibimos un porcentaje alto de la radiación infrarroja que no es visible.

En varios estudios, (Oke T. R., 1990) (Jones & Vaughan, 2010) se definen los perfiles de transmisividad, reflectividad y absorptividad de una hoja verde tipo como muestra la figura siguiente:

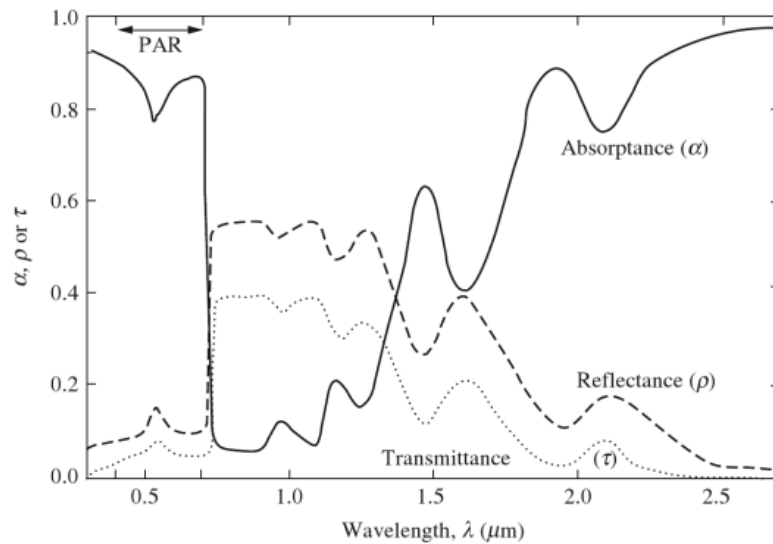


Figura 18 Espectros típicos de absorción, transmisión y reflexión para hojas . Fuente: (Jones & Vaughan, 2010).

La radiación por una cobertura vegetal, está compuesta de radiación difusa, inter-reflejada por las hojas y paramentos circundantes, y de radiación directa que pasa a través de las hojas y transmitida.

La transmitancia de radiación de onda larga se define como el cociente entre el flujo de radiación de onda larga que la hoja recibe y la que pasa a través de ella. La radiación de onda larga absorbida por las hojas fue definida por Palomo del Barrio (1998) como

$$Q_{rad} = (1 - \tau_l) [\sigma T_{sky}^4 + \sigma T_g^4 - 2\sigma T_p^4]$$



Donde  $\phi_{rad}$  es la radiación de onda larga absorbida (W);  $\tau_l$  es la transmitancia de la hoja;  $T_{sk}$  es la temperatura del cielo (K);  $T_g$  es la temperatura del sustrato (K); y  $T_p$  es la temperatura de la hoja (K),  $\sigma$  es la constante de Stephan- Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ w/m}^2\text{K}^4$ ).

La transmitancia a través de la capa vegetal ( $\tau$ ) se puede asimilar a la transmitancia a través de un medio turbulento. Se puede expresar como una función del coeficiente de extinción  $k_l$ , que depende de la geometría de la capa vegetal, y del LAI, índice de superficie de las hojas. La transmitancia se expresa como:

$$\tau_l = \exp(-k_l LAI)$$

Palomo del Barrio, da diferentes valores a  $k_l$  para diferentes distribuciones de hojas. Estos valores se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 7 Valores del coeficiente  $k_l$  las diferentes distribuciones de hoja

Distribuciones de hoja	$k_l$
Horizontal	1 to 1.5
Cónica ( $\alpha=45^\circ$ )	0.829
Vertical ( $\alpha=90^\circ$ )	0.436
Esférica	0.684 to 0.81

$\alpha$ =ángulo entre las hojas y el plano horizontal

La radiación de onda corta transmitida por la hoja se define como la suma de la radiación no interceptada y la radiación transmitida hacia el sustrato (Del Barrio, 1998).

La radiación de onda corta a través de la hoja es una función del LAI y el coeficiente de extinción  $k_s$  del mismo modo que para la radiación de onda larga. Palomo del Barrio da valores del coeficiente  $k_s$  para diferentes geometrías de hoja. Estos valores se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 8 Coeficiente de extinción de onda corta

Distribución de hoja	$K_s$
Horizontal	1.1
Vertical ( $\alpha=90^\circ$ )	0.29
Promedio	0.74

La reflectancia de la capa vegetal es siempre menor que la de las hojas por separado debido al sombreado mutuo entre las hojas. La reflectancia de la capa vegetal se puede expresar como el porcentaje de una capa vegetal densa ideal, en la que se asume que la capa vegetal cubre el sustrato por completo interceptando 100% de la radiación que recibe.

$$\rho_s(LAI) = (1 - \tau_l)(LAI) \rho_x$$

Donde  $\rho_s(LAI)$  es la reflectancia de la capa vegetal para un determinado LAI;  $\tau_l$  es la transmitancia de la hoja; y  $\rho_x$  es la reflectancia de una capa vegetal densa.

La capa vegetal absorbe una fracción igual a  $1 - \tau_s - \rho_s$  de la radiación de onda corta que recibe, por tanto, la radiación solar neta en la capa vegetal puede expresarse como:

$$Q_{radsol} = [1 - \tau_s - (1 - \tau_s) \rho_x] (1 + \tau_s \rho_g) Q_s$$

Donde  $\phi_s$  es la radiación en la parte superior de la capa vegetal;  $\rho_g$  es la reflectancia del sustrato; y  $\tau_s$  es la transmitancia a través de la capa vegetal.

Estudios empíricos han determinado que la absorptividad de diferentes tipos de plantas. Por ejemplo, Gates y otros autores, estiman la absorptancia característica de hojas de diferentes especies, geometría de hojas y radiación de onda larga con valores comprendidos entre el 40% y el 85% (Gates, Keegan, J.C.Schleter, & V.R.Weidner, 1965). En la misma línea de investigación, Kimes & Smith determinaron la absorptancia total de una capa vegetal de determinados espesores, especificando valores comprendidos entre 60% y 67% dependiendo de las diferentes especies vegetales (Kimes & Smith., 1980).

Considerando que la absorptancia en cubiertas típicas de grava u hormigón tienen absorptancias cercanas a 90%, la reducción de energía absorbida por la cubierta es notoria. El efecto en la reducción en la energía absorbida se traduce directamente en la reducción de la temperatura superficial de la cubierta, reduciendo por tanto la energía re-radiada al aire y el flujo de calor conductivo a través de la cubierta.

Desde el punto de vista de control microclimático lo deseable es que el ciclo de foliación se adecúe en cuanto a su transmisividad a las necesidades de calentamiento y enfriamiento estacionales de los espacios urbanos. Esto se consigue con el uso de especies caducifolias, por ejemplo el Plátano (*Platanus acerifolia*) bloquea un 58,9 % de la radiación en invierno, pero en verano este valor asciende a un 88%.

En las cubiertas ajardinadas, por su ubicación, las especies usadas son comúnmente de hoja perenne, de tipo alpino para poder adaptarse a las condiciones climáticas extremas dada su alta exposición. En este tipo de infraestructura vegetal, los estudios sobre su impacto se centran en el *Leaf Area Density* (LAD) que se definen como el área de hojas (por una cara) por unidad de volumen. La integración vertical del perfil de la estructura vegetal representa el *Leaf Area Index* (LAI), que se define como el área total de hojas (por una cara) por unidad de superficie de suelo sobre la que se proyecta el área de la estructura vegetal (Hosoi, 2009). Estos índices representan la densidad de las estructuras vegetales a efectos de cálculo para poder tener en cuenta los fenómenos de dispersión, absorción y transmisión de la radiación

solar incidente debido a las inter-reflexiones de las hojas y a su dispersión a través de la estructura dispersión. El LAD y el LAI se consideran los factores más críticos cuando se evalúa su efecto sobre los microclimas urbanos (Theodosiou, 2003).

La definición de patrones precisos que reflejen la distribución de la radiación en los elementos vegetales es muy difícil por la multitud de factores que los configuran. Para simplificar su análisis, diversos autores han desarrollado modelos simplificados para el cálculo de la radiación en las estructuras vegetales (Campbell & Norman, 1998), (Goudriaan, 1986). Estos modelos consideran los elementos vegetales como estructuras de hojas horizontales aleatoriamente dispuestas y definidas por el LAD y el LAI.

Las mediciones de temperaturas por debajo de las estructuras vegetales de especies diferentes se han estudiado ampliamente, mostrando que la presencia de estructuras densas con un mayor LAD se asocia con menores temperaturas de la superficie bajo la estructura durante el día (Blanusa T. V., 2012), lo que confiere un peso muy importante a la correcta selección de especies a la hora de integrar elementos vegetales como herramienta de control microclimático, como en el caso de las cubiertas ajardinadas que son el objeto de análisis de esta investigación.

---

#### 7.1.1 ALBEDO Y EMITANCIA

Otras de las propiedades radiativas de la vegetación son el albedo y la emitancia. Para describir la cantidad de radiación solar que es reflejada por una superficie, se utiliza el término albedo, un albedo de 1,0 corresponde a una superficie que refleja el 100 %, mientras que un albedo de 0,0 se refiere a una superficie que absorbe toda la radiación solar incidente. En la tabla siguiente se muestran valores de albedo y emitancia superficial de onda larga de algunos elementos encontrados frecuentemente en el paisaje urbano.

Tabla 9 Características radiativas de diferentes superficies urbanas y vegetales. Fuente:

Elaboración propia en base a Ochoa. (Ochoa J. M., 1999).

Tipo de superficie	Material	Albedo %	Emisividad%
Superficies urbanas	Asfalto	5-15	95
	Hormigón	10-50	71-90
	Ladrillo	20-50	90-92
	Piedra clara	50-90	85-95
Vegetación	Césped	20-30	90-95
	Pastizal	25-30	90-95
	Bosque mixto	5-20	90-95
	Coníferas	5-16	97-98
	Sedum	15-50	80-99

Como se ve en la tabla, las cubiertas vegetales pueden llegar a valores de albedo de 50, con valores de emisividad en torno a 90. Estos factores se traducen en un Índice de Reflexión Solar <sup>7</sup> en torno a 58, sustancialmente más bajo que en una cubierta asfáltica (SRI~13) y equivalente a cubiertas claras de hormigón. Esto se traduce en una menor energía solar absorbida.

## 7.2 INFLUENCIA SOBRE LA VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO

En ambientes urbanos con una alta densidad de construcción, el viento, a niveles cercanos al suelo, está definido principalmente por la estructura del cañón urbano determinado por la

<sup>7</sup> El Índice de Reflectancia Solar (SRI.) es una métrica de la capacidad del techo para rechazar el calor solar, representada por su aumento de temperatura. Se define que un negro estándar (reflectancia 0.05, emittance 0.90) es 0 y un blanco estándar (reflectancia 0.80, 0.90 del emittance) es 100. Por ejemplo, el negro estándar tiene un aumento de la temperatura de 90 grados F (50 grados C) a pleno sol, y el blanco estándar tiene un aumento de la temperatura de 14,6 grados F (8.1 grados C). Una vez que el aumento de la temperatura máxima de un determinado material se ha computado, el SRI puede ser computado por interpolación entre los valores de blanco y negro.

anchura de las calles, la altura de los edificios, la continuidad y dirección de la trama urbana, las diferencias entre alturas de los edificios, etc. La vegetación en el cañón urbano tiene un efecto menos apreciable. En el caso de las cubiertas ajardinadas el efecto es inapreciable.

En zonas suburbanas, con predominio de viviendas unifamiliares, los efectos de la vegetación sobre el viento son más apreciables, al respecto (Heisler, 1989), encontró que incluso árboles dispersos, pueden tener un efecto significativo. La siguiente figura muestra los resultados de éste estudio. El gráfico muestra como dependiendo de la densidad de construcción, un aumento del 10 % en el área cubierta por árboles, puede reducir del 10 al 20 % la velocidad del viento, y uno del 30 % puede reducirla del 15 al 35 %. Este efecto se mantiene también en invierno, aun cuando muchos de los árboles han perdido sus hojas, éstos siguen conservando entre 50 y 90 % de su capacidad de frenado del viento.

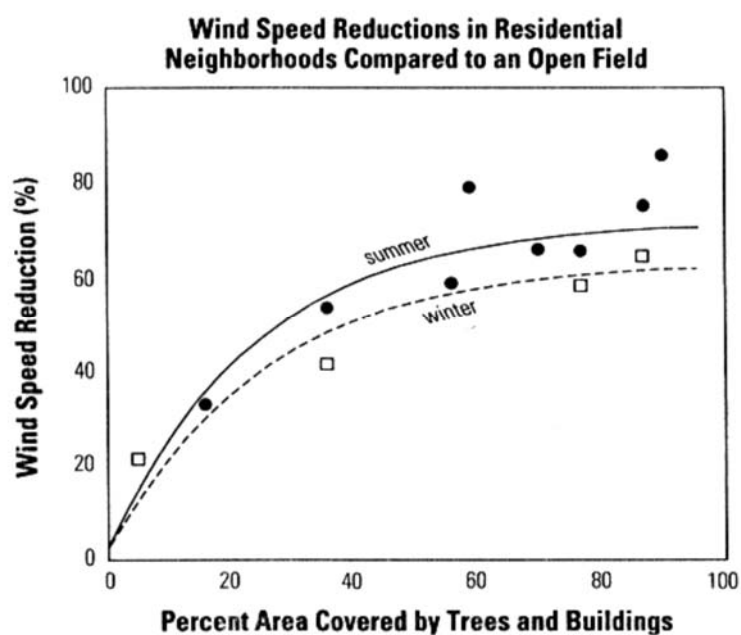


Figura 19 Reducción en la velocidad del viento para diferentes densidades de la trama urbana en comparación con una zona libre de obstáculos construidos o vegetales. Fuente: (Heisler, 1989).

Otro de los usos tradicionales de los sistemas vegetales en los entramados urbanos es la protección contra viento. En los grandes espacios abiertos, donde las masas arboladas tienen

una gran influencia en la velocidad del viento, y pueden reducir la velocidad hasta un tercio, en comparación de la que habría en campo abierto (Ochoa J. M., 1999). El grado de protección contra el viento que brinda una barrera depende básicamente de la velocidad y dirección del viento, de las dimensiones de la barrera (altura, anchura y longitud), de la densidad y penetrabilidad del material que la constituye y finalmente de su forma. De éstos factores el aspecto más importante de la barreras compuestas por vegetación es la permeabilidad, tanto más densa sea la obstrucción, mayor será la reducción del viento a sotavento, sin embargo su efecto se aminora a distancias más cortas que con las barreras menos densas, por lo que una densidad media será la más efectiva, además de producir menos turbulencias. En el caso de las cubiertas ajardinadas, el efecto es el aumento de rugosidad de la capa sobre la cubierta, influenciando el flujo sobre la cubierta en función de su densidad y características vegetales.

### 7.3 INFLUENCIA SOBRE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD DEL AIRE.

Los principales efectos reportados de la vegetación sobre la temperatura y la humedad son la reducción de la temperatura ambiente y el aumento en la humedad del aire (Oke T. , 1988). Esto se debe al efecto de la sombra proyectada sobre las diversas superficies vegetadas, pero sobre todo al fenómeno de la evapotranspiración, que es el proceso de evaporación del agua que transpiran las plantas. Otra pequeña contribución se debe a la humedad del suelo. Sin embargo, en elementos vegetales aislados no es muy significativo, ya que desaparece rápidamente debido a los movimientos del aire, ya sea por viento o convección.

Cuando se trata de un microclima aislado de los sistemas atmosféricos predominantes, entonces sí es posible apreciar los efectos de la vegetación. Un ejemplo serían los grandes parques en áreas densamente urbanizadas, rodeados de edificios altos en todos sus costados, o bien los patios interiores de manzana y de los edificios. Oke reportó, en mediciones hechas en distintas ciudades, diferencias de temperatura ambiente de más de 5°C entre parques urbanos y las zonas edificadas circundantes (Oke T. , 1988). Estudios similares se hicieron en el parque zoológico de Berlín (212 ha de superficie verde en el centro de la ciudad) donde

las diferencias de temperatura fueron de 5-7°C y la humedad relativa variaba un 10% (Hoerbert & Kirchgeorg, 1982).

En menor medida, se han realizado estudios para evaluar el impacto de las cubiertas ajardinadas sobre el nivel de calle. Uno de estos estudios, realizado para la ciudad de Hong Kong, muestra reducciones de temperatura de entre 1 y 2 °C a nivel de calle en vecindarios residenciales de baja altura modelados con cubiertas ajardinadas (Peng & Jim, 2013). Un estudio experimental realizado en La Rochelle, en Francia, analizó el potencial para reducir el calentamiento de las cubiertas y fachadas vegetales en un modelo a escala de un cañón urbano con una relación de aspecto H/W de 1,2 en condiciones climáticas reales. La cubierta ajardinada instalada en el modelo fue sedum, y las fachadas del cañón urbano estaban orientadas E-O y pintadas de blanco con una reflectividad de 0,64 . En base al radio de aspecto del cañón, el modelo de flujo en su interior se definió como vórtice. Los resultados del análisis experimental mostraron el potencial para reducir el sobrecalentamiento en el cañón urbano de los sistemas vegetales, tanto las fachadas como las cubiertas provocaron un descenso en el sobrecalentamiento de hasta 1°C por cada 3° de sobrecalentamiento en el caso de la fachada y 1°C por cada 8°C de sobrecalentamiento en el caso de la cubierta ajardinada. En ambos casos se registró un aumento de la humedad relativa en torno al 6% (Djedjig, Emmanuel, & Belarbi, 2013).

Los resultados de estos estudios muestran que la temperatura y humedad del aire son parámetros con una influencia limitada por parte de los elementos vegetales, ya que las corrientes de aire dispersan rápidamente cualquier modificación que originen, salvo que se trate de grandes masas arboladas o zonas confinadas. Esquemáticamente, el efecto del elemento vegetal objeto de estudio, la cubierta ajardinada, se puede representar según los diagramas siguientes:



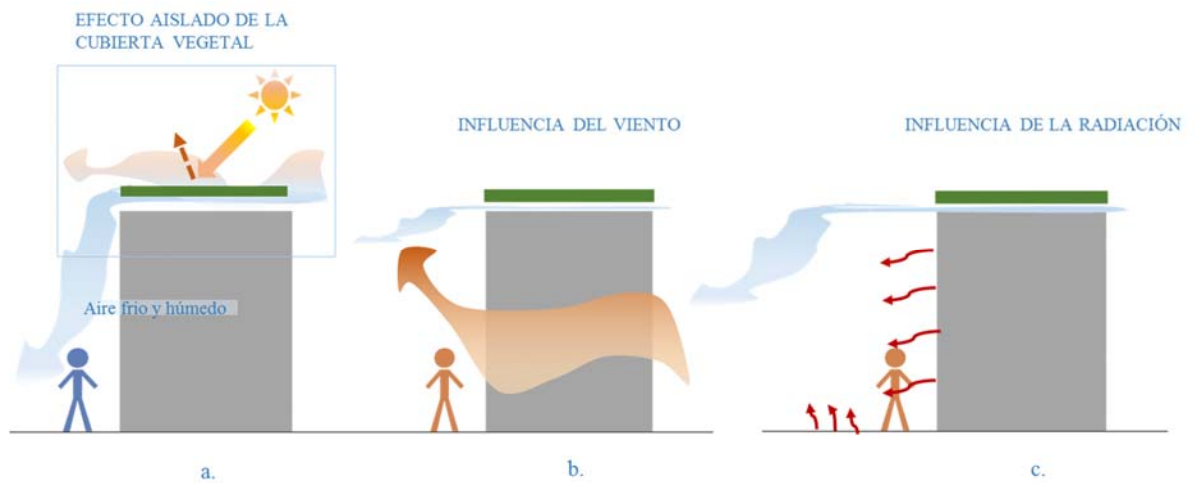


Figura 20 Efecto de la cubierta ajardinada y parámetros influyentes. Fuente: elaboración propia.

El caso a. muestra el efecto teórico que tendría una cubierta ajardinada sobre el microclima del cañón. El aire cálido de verano, al pasar por la vegetación de la cubierta y en función de la densidad de vegetación en ésta (LAD) se ralentiza, se aumentan los intercambios energéticos principalmente por radiación, evaporación y convección. Este aire que pasa por la cubierta vegetal se enfría y se vuelve más denso, tendiendo a descender, y con su movimiento, produciendo el desplazamiento del aire cálido y seco, por un aire más fresco y con mayor humedad relativa, enfriando así el volumen de aire cerca del suelo, la parte habitable del cañón.

Sin embargo, la radiación y el viento dentro del cañón urbano, son los factores que alteran este fenómeno de enfriamiento pasivo, ya que por un lado, el viento cálido puede arrastrar esta masa de aire frío que desciende de la cubierta mitigando así su efecto refrigerante ( Figura 17.b.) y del mismo modo, la radiación de onda larga reemitida por los paramentos de las superficies expuestas a la radiación solar, calientan la capa de aire alrededor del edificio frenando así este aire fresco y no permitiendo que alcance el nivel del suelo ( figura 17.c.).

Los procesos que intercambio energético que se dan en la cubierta ajardinada son los siguientes:

El **intercambio radiativo** se ha explicado en la sección anterior, y está ligado a las propiedades ópticas de la superficie vegetal.

El **proceso de evaporación** explicado en el capítulo 6 implica grandes cantidades de calor absorbidas y por tanto una reducción de temperatura. La cantidad de líquido evaporado se puede determinar por medio de la ecuación de Sprenger:

$$A_v = \eta A (P_{vs} - P_a)$$

Donde  $\eta$  es el coeficiente de evaporación, función de la velocidad del aire;  $A$  es la superficie de hoja ( $m^2$ );  $P_{vs}$  es la presión de saturación a temperatura ambiente ( $Kg/m^2$ ); y  $P_a$  es la presión atmosférica ( $Kg/m^2$ ).

De acuerdo con la ecuación de Sprenger, la energía consumida en los procesos de evaporación es proporcional a la cantidad de agua evaporada tal y como se define en la ecuación previa:

$$Q = 666 A_v$$

Donde  $Q$  es la energía consumida (W), y  $A_v$  es la cantidad de agua evaporada (kg).

La evaporación es uno de los fenómenos principales en el enfriamiento del aire en la capa vegetal. Una superficie cubierta por vegetación puede disipar 3 Kwh/m<sup>2</sup> de energía por medio de evapo-transpiración durante un día soleado en verano, lo que supone un 20% de la energía absorbida solar total por las plantas durante ese periodo de tiempo (Britto-Correa, 2002) ; (Krusche, 1982). La energía disipada por las plantas durante el proceso de evapo-transpiración hace que la temperatura en la capa vegetal se vea reducida, lo que resulta en reducciones potenciales entre la temperatura superficial de una cubierta plana común y una cubierta ajardinada de más de 15°C (Britto-Correa, 2002).

El **intercambio convectivo** se produce entre las hojas y el aire y entre el sustrato y el aire y depende de la diferencia de temperatura con el aire. Este intercambio es proporcional al coeficiente de convectividad, que depende de la velocidad del aire. Los intercambios convectivos caracterizan el microclima inmediatamente superior a la capa vegetal. La fricción del aire con las hojas reduce la velocidad del aire sobre la superficie del sustrato y por lo tanto los intercambios por convección se reducen sobre esta superficie. Según Palomo del Barrio (1998) el intercambio convectivo en la capa vegetal viene dado por la siguiente expresión de la Ley de Newton:

$$Q_{conv, p-a} = -Q_{conv a-p} = -2LAI\rho c_p/r_e(T_p - T_a)$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $c_p$  es el calor específico;  $r_e$  es la resistencia superficial;  $T_p$  es la temperatura superficial y  $T_a$  es la temperatura del aire.

Los datos experimentales disponibles no son concluyentes acerca de una ecuación capaz de predecir la resistencia superficial ( $r_e$ ) de las hojas expuestas a vientos de baja velocidad y con bajas diferencias de temperatura entre ellas y el aire (Stahgellini, 1987) por tanto,  $r_e$  solo se puede hallar experimentalmente en cada análisis.

El objeto de esta investigación se centra en el impacto sobre la temperatura del aire y la humedad relativa con el fin de identificar en qué condiciones la cubierta vegetal puede maximizar la influencia sobre ellos y mejorar las condiciones microclimáticas en el cañón urbano.

## 8. MÉTODO DE ANÁLISIS: HERRAMIENTAS Y MODELOS

El análisis de los intercambios energéticos que ocurren en un cañón urbano ha sido analizado por numerosos autores a lo largo de las últimas décadas. Desde los modelos que reproducen las condiciones exteriores y el microclima urbano influenciado por la vegetación, como (Oke T. , 1988), (Robitu, Inard, Groleau, & Musy, 2004) (Sánchez de la Flor & Alvarez Domínguez, 2004), (Santamouris M. , 2012), (Vinet, Raymond, & Inard, 2000) hasta los modelos que evalúan los intercambios energéticos con los edificios que confinan el entorno urbano (Olgyay & Olgyay, 1992) (Nikolopoulou, Baker, & Steemers, 1999).

Esta sección analiza algunos de los modelos más representativos para seleccionar de las herramientas que mejor reproduzcan el efecto de la cubierta ajardinadas desde la óptica de los objetivos propuestos para esta investigación:

- Análisis de las condiciones hidrométricas del microclima afectado por una cubierta ajardinada
- Análisis energético de los edificios afectados por este microclima

Para el desarrollo de estos objetivos se han analizado tres tipos diferentes de herramientas de cálculo. El primer grupo, basado en modelos de análisis climático fundamentados en dinámica de fluidos computacional, el segundo tipo, basado en herramientas de simulación energética a nivel edificio, y en tercer lugar, herramientas mixtas, con capacidad para modelar tanto el ambiente exterior como el interior de los edificios.

## 8.1 MODELOS MICROCLIMÁTICOS URBANOS

En términos generales, el balance energético de un microclima urbano se puede representar por una fórmula general en la que:

$$(1 - r) S \downarrow + L \downarrow = L \uparrow + H + \lambda E + G$$

donde  $S \downarrow$  y  $L \downarrow$  representan la energía solar incidente y la radiación de onda larga respectivamente,  $r$  es albedo,  $L \uparrow$  es la radiación de onda larga re-emitida,  $H$  es el calor sensible,  $\lambda E$  es calor latente, y  $G$  es el almacenamiento de calor, (Bonan, 2002).

Los modelos microclimáticos, con o sin vegetación, se basan en la modelización del flujo atmosférico, y para ellos hay tres metodologías: modelos físicos de túnel de viento, modelos analíticos basadas en cálculos algebraico que dada su naturaleza lineal requieren de simplificaciones para poder dar un acercamiento a la resolución del análisis del fluido, y por último, modelos numéricos basados en ecuaciones diferenciales que son las que mejor se acercan a la modelización del comportamiento de los fluidos. Este método de cálculo diferencial se basa en la discretización en el tiempo y en el espacio del fluido usando elementos finitos y, dada su complejidad, requieren del uso de herramientas de cálculo informático.

La principal dificultad del estudio del flujo atmosférico es su naturaleza turbulenta, caracterizada por las variaciones de su velocidad en todas las direcciones con infinitos grados de libertad, su resolución numérica es imposible por las características de las ecuaciones que los definen y la interrelación entre sus variables (temperatura, velocidad, presión,...). Los flujos como el viento, son tridimensionales, continuos, caóticos, intermitentes, y se disipan, con transferencias entre el momento, la transferencia de calor y la masa. Sus características vienen dadas a un nivel infinito de escalas, lo que requiere que para su estudio se definan mallas nodales.

Los tres tipos de modelos principales desarrollados para la resolución de este tipo de flujos son tres: de simulación numérica directa (DSN), de simulación de remolinos largos (LES) y las

ecuaciones de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS). El uso de un sistema u otro depende de la escala de la simulación, tanto espacial como temporal.

Los modelos numéricos para el análisis de flujos en la atmósfera que se rigen por las ecuaciones del equilibrio:

Ecuación de conservación de la masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla (\rho \vec{u}) = 0$$

Ecuación de conservación del momento:

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = - \vec{\nabla} p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f}$$

Ecuación de conservación de la energía:

$$\rho \left( \frac{\partial c_p T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T \right) = \mu \nabla^2 T + Q_T$$

En el estudio de los fenómenos físicos involucrados en el balance energético de los espacios urbanos, varios autores han desarrollado modelos numéricos que intentan aproximarse y simplificar las inter-relaciones que resultan en unas determinadas condiciones microclimáticas (Robitu, Musy, Inard, & Groleau, 2005), (Sánchez de la Flor & Alvarez Domínguez, 2004), (Oke T. , 1982) (Bruse & Fleer, Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. , 1998), (Honjo, 1990-1991), (Vinet, Raymond, & Inard, 2000) entre otros.

Una de las aproximaciones es la de la simplificación del espacio urbano en el concepto de cañón urbano, que representa una forma de abstraer la complejidad de la geometría urbana en un sistema simple configurado por los límites de fachadas y suelo. En esta geometría simplificada, se analizan

los flujos de intercambio de calor que se producen en el volumen de aire del cañón, (Flor & Domínguez, 2004), (Santamouris M. , 2001), (Robinson & Stone, 2004). En esta aproximación, la radiación se simula de acuerdo a dos modelos diferentes:

1. Modelo Isotrópico, basado en la hipótesis de un cielo isotrópico en el que la radiación se considera igual para todas las direcciones, o
2. Modelos anisótropos, en los que el cielo se representa según tres componentes, un fondo isótropo, un resplandor circunsolar y el resplandor del horizonte.

Según Robinson & Stone, estos modelos derivan en errores de cálculo significativos, por los que en los modelos computacionales, se usan unos algoritmos simplificados denominados Simplified Radiosity Algorithm ( SRA) <sup>8</sup>. Con este algoritmo, el cálculo tiene en cuenta las componentes de radiación directa, difusa y la componente del cielo multiplicada por un vector matricial que representa la contribución de cada superficie en el interior del cañón. Este algoritmo ha sido diseñado para facilitar la integración entre los modelos de microclima y los de edificios.

Estos estudios desarrollan modelos que representan del balance energético en el ámbito urbano y han demostrado ser un método efectivo para la cuantificar el impacto de la vegetación en el microclima (Robitu, Musy, Inard, & Groleau, 2005). Sin embargo, para poder capturar dinámicamente las variaciones microclimáticas y cuantificar el efecto de la vegetación en el entorno urbano teniendo en cuenta las variaciones temporales y los cambios en las condiciones en el fluido atmosférico, es necesario el uso de herramientas basadas en el cálculo de dinámica de fluidos computacional.

Una metodología es la basada en un enfoque multiescala como el propuesto por Robinson, que se basa en un modelo acoplado de Urban Canopy, entendida como la superficie de la ciudad, un modelo energético para los edificios (Building Energy Model, BEM), un modelo de microescala

basado en técnicas de inmersión de superficie (IST<sup>9</sup>), junto con un modelo de radiación SRA que calcula la radiación incidente sobre los edificios.

Dada la escala del ámbito urbano, que normalmente abarca cientos de metros, los modelos IST son los más usados, ya que permiten la reproducción de geometrías en 3D con relativa facilidad. Los modelos de urban canopy que incorporan, permiten la representación en 3D de los edificios, y su impacto en los esfuerzos de corte y arrastre, así como la diferenciación de las propiedades entre los entre los diferentes elementos que componen la geometría urbana (suelos, paredes, cubiertas,...), aunque normalmente están limitados a la representación de geometrías paralelepíedicas regulares.

Los modelos IST más complejos son los multicapa, que permiten el análisis del Canopy layer en su dimensión vertical. Velocidad, temperatura y humedad se calculan en cada superficie de forma autónoma y posibilita el análisis de variables en cualquier punto de la malla.

---

#### 8.1.1 MODELOS BASADOS EN HERRAMIENTAS CFD

La Dinámica de fluidos computacional (CFD) es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que aumenta la velocidad de cálculo como así disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala. Hay diferentes software que permiten el desarrollo de modelos que incluyan los elementos climáticos de estudio, Fluent, Open Foam, y otras herramientas similares, permiten el cálculo numérico detallado de los

---

<sup>9</sup> Metodología desarrollada por ASCOP GmbH que representa la envolvente de un sólido a través de una función que toma valores positivos en el fluido y negativos en el sólido. El cuerpo sólido viene representado por su densidad, calor específico y conductividad térmica. En este sistema se resuelve el problema de la transferencia de calor por medio de las ecuaciones de Navier-Stokes, modificadas.



microclimas, sin embargo, la representación de modelos a escala urbana y la escala temporal de simulación (normalmente varias horas), hacen prohibitivo el uso de este tipo de metodología.

---

### 8.1.2 MODELIZACIÓN DEL EFECTO DE LA VEGETACIÓN

La modelización del impacto vegetal en el microclima, requiere la inclusión en las ecuaciones del equilibrio de los fenómenos que caracterizan los componentes bióticos. Evaporación, transpiración, fotosíntesis y modificación del modelo de radiación se deben incorporar en el modelo numérico.

Uno de los modelos basados en herramientas CFD que mejor describen el microclima urbano con elementos vegetales es el desarrollado por Robitu y otros en el 2005. Los autores desarrollaron un modelo de cálculo para su inclusión en un programa de dinámica de fluidos computacional en el que se formulan los fenómenos microclimáticos que afectan balance energético e integra las interacciones entre el espacio construido, la atmósfera y la vegetación. El modelo se basa en las ecuaciones incluye los siguientes componentes:

#### 1. Movimiento del aire en el entorno urbano:

Este factor se define por las siguientes ecuaciones:

##### a. Continuidad:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0,$$

##### b. Ecuación del momento:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = & -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \\ & + \delta_{i3} g \beta (\bar{T} - T_a) - \frac{2}{3} \frac{\partial k}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho_a} S_{u_i}, \end{aligned}$$

##### c. Ecuación de la energía:

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (D_T + D_T) \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho_a c_p} S_T,$$

##### d. Conservación de la humedad:

$$\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (D_q + D_{qt}) \frac{\partial \bar{q}}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{\rho_a} S_q,$$

e. Energía de la turbulencia:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k + G_k - \varepsilon + \frac{1}{\rho_a} S_k,$$

f. Disipación de la energía:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) \\ & + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + G_k) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{1}{\rho_a} S_\varepsilon, \end{aligned}$$

Donde

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{\nu_t}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2, \\ G_k &= -\frac{\nu_t}{c_p} \mathbf{g} \beta \frac{\partial T}{\partial x_j} \delta_{j3}, \\ \nu_t &= C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \end{aligned}$$

En este modelo, el componente vegetal del microclima se ha modelado como un término fuente cuyo efecto es la variación del flujo del aire disminuyendo su velocidad (Kobayashi, Pereira, & Siqueira, 1994). Estos términos fuente, se introducen en las ecuaciones anteriores del modo siguiente:

Ecuación del momento:

$$S_{u_i} = -\frac{1}{2} \rho_a \cdot c_d \cdot \text{LAD} \cdot u_i \cdot \mathbf{u}.$$

Ecuación de la conservación de la energía:

$$S_T = R_{n,\text{vol}} - \text{LAD}(\varphi_{\text{conv}} + \text{LE}_v),$$

Éste término tiene en cuenta el volumen de radiación, el flujo convectivo  $\varphi_{\text{conv}}$  y el calor latente de evaporación de la superficie de las hojas  $\text{LE}_v$ . Estos dos últimos elementos están ponderados en función del LAD. La radiación absorbida por el árbol viene dado por:

$$R_n = (1 - a - \tau)\varphi_{\text{sol}} + (1 - a)\varphi_{\text{mr}} - (\varphi_{\text{LW}} + \varphi_{\text{sky}}).$$

Donde:

En la ecuación de conservación de la humedad, el término fuente de la humedad es:

$$S_q = -\text{LAD} \cdot E_v,$$

Donde  $E_v$  es el flujo evaporativo y viene dado por

$$E_v = \rho_a \frac{q_{\text{sat}}(T_v) - q_a}{r_b + r_{\text{sto}}}.$$

La resistencia a la transferencia de masa y calor  $r_b$  viene dado por la ecuación (Dauzat, Rapidel, & Berger, 2001):

$$r_b = 130 \left( \frac{l}{u} \right)^{0.5}.$$

El flujo de calor latente y el convectivo dependen del gradiente de humedad entre la superficie de la hoja (considerada como saturada)  $q_{\text{sat}}(T_v)$  y el aire del ambiente  $q_a$ . La capa límite tiene una resistencia  $r_b$  y la resistencia estomatal,  $r_{\text{sto}}$ .

$$\varphi_{\text{conv}} = \rho_a c_p \frac{T_v - T_{\text{a,ref}}}{r_b}.$$

## 2. Modelo de transferencia por radiación:

El modelo de la transferencia por radiación se divide en dos componentes, la radiación solar y la radiación de onda larga reemitida

Para cada elemento de la escena urbana (edificios, suelo, vegetación, agua, etc.), la contribución solar global se calcula como la suma de las irradiancias directas, difusas y reflejadas. Esta contribución se utiliza para inicializar un algoritmo de refinamiento progresivo que trata las inter reflexiones entre las superficies de la escena urbana con el fin de obtener el flujo de radiación solar neta (Miguet & Groleau, 2002). La irradiancia en cada nodo de la red superficial viene dada por:

$$J_i = J_{0i} + a_i \sum_{j=1}^n J_j \cdot F_{ij}.$$

Los intercambios radiativos de onda larga ,  $\varphi_{LW}$ , entre las diferentes superficies de la escena urbana se calculan mediante el uso del factor de vista<sup>10</sup> de cada superficie,  $F_{Sext,j}$ :

$$\varphi_{LW} = \sum_{j=1}^n \varepsilon_{Sext} F_{Sext,j} \sigma (T_{Sext}^4 - T_{Sj}^4).$$

Los intercambios radiativos entre las superficies de la escena urbana y el cielo se hacen en función de factor de vista de cielo,  $F_{Sext,sky}$ .

$$\varphi_{sky} = F_{Sext,sky} (\sigma \varepsilon_{Sext} T_{Sext}^4 - L_a).$$

La radiación de cielo se expresa como por la siguiente fórmula (Monteith & Unsworth, 1991).

$$L_a = 5.5T_a + 213.$$

La transferencia radiativa en las capas vegetales es un proceso complejo que depende de la radiación incidente, las propiedades ópticas y la geometría de la vegetación (Ross, 1975), Parte de la radiación solar que incide sobre la vegetación se refleja otra parte penetra entre la vegetación

---

<sup>10</sup> El factor de vista  $F_{ij}$  entre dos pequeñas zonas  $A_i$  y  $A_j$  se define como la fracción de la radiación que abandona la zona  $A_i$  y es interceptada por la zona  $A_j$ . En otras palabras,  $F_{ij}$  representa cómo bien la zona  $A_i$  ve a  $A_j$ . El factor de vista  $F_{ij}$  depende de la orientación de las pequeñas zonas  $A_i$  y  $A_j$  y de la distancia entre ellas.

donde una fracción es absorbida y otra es transmitida pudiendo así alcanzar las superficies del entorno urbano. La figura siguiente muestra los componentes del fenómeno radiativo en los elementos vegetales.

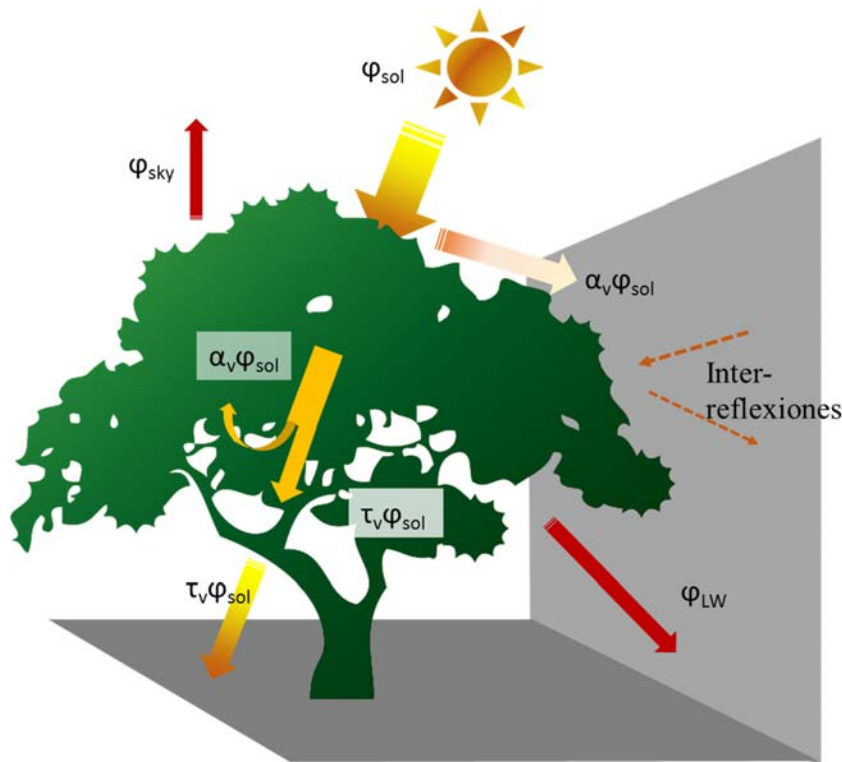


Figura 21 Intercambios radiativos en los elementos vegetales. Fuente: elaboración propia a partir de Robitu y otros, (Robitu, Musy, Inard, & Groleau, 2005).

En función de las características de cada superficie, el balance energético integra las transferencias energética por radiación, convección, conducción y el calor latente absorbido en los procesos evaporativos (Robitu, Inard, Groleau, & Musy, 2004).

La principal conclusión de este análisis es que este tipo de modelo numérico, basado en el acoplamiento de los modelos de radiación térmica y el de flujo de aire para la simulación de la transferencia de momento, calor y vapor de agua en área urbana, incluyendo los elementos vegetales es capaz de calcular la radiación solar y térmica, velocidad del aire, temperatura y humedad en espacios urbanos complejos. Esta metodología es útil para el diseño y análisis del

entorno urbano, ya que proporciona datos clave para el diseño como la temperatura del aire, la humedad específica, la velocidad del viento y radiación en entorno urbano. Sin embargo, el tiempo de cálculo requerido por el modelo CFD es prohibitivo.

## 8.2 MODELOS ENERGÉTICOS: BUILDING ENERGY MODEL ( BEM)

En esta sección se hace una breve revisión de los modelos de energía a nivel edificio, “*Building Energy Software*” (BES).

### eQUEST

Es una herramienta de simulación energética dinámica horaria muy probada en el sector de la eficiencia energética. Su facilidad de uso, los valores predeterminados dinámicos, los gráficos interactivos, la facilidad de análisis paramétrico y ejecución rápida hacen de eQUEST un software muy atractivo para simulaciones de eficiencia energética como herramienta de diseño durante el proceso, desde las etapas conceptuales hasta las etapas finales de diseño. El motor de simulación de eQUEST, DOE 2.2, está también muy probado y tiene mucho reconocimiento. Las salidas del modelo incluyen resultados comparativos horarios. Sus limitaciones vienen en la definición de sistemas complejos y el acoplamiento de la tierra y la infiltración natural en modelos de ventilación natural, que aún son simplificados y con posibilidades de análisis limitadas. Su velocidad de ejecución es factible para realizar muchas evaluaciones de modelos grandes, capturar interacciones críticas entre sistemas en el nivel de construcción de conjunto. Sin embargo, no tiene capacidad para realizar modelos en ambientes exteriores ni integrar elementos vegetales en el sistema.

### Energy Plus

Es un programa de última generación en la simulación energética de edificios. EnergyPlus incluye capacidades innovadoras de simulación que incluyen intervalos de simulación de menos de una hora, y estructuras de datos de entrada y salida para facilitar el desarrollo de la interfaz de terceros de cara a co-simulación. Las recientes adiciones incluyen aire multizona, simulación de la energía eléctrica como pilas de combustible y otros distribuidos sistemas de energía, uso de agua en sistemas de construcción, precipitación, agua subterránea y uso de agua en el edificio. Las

funciones de simulación son precisas y detalladas. Como puntos débiles, la entrada de texto puede hacerlo más difícil de usar que interfaces gráficas y en cuanto a la capacidad de simular ambientes exteriores y vegetación, es muy limitada.

### Design Builder

Es una herramienta de modelado fácil de usar y proporciona un rango de datos de ambientales tales como: consumo de energía, confort interno datos y tamaños de componentes HVAC. La salida de datos es horaria utilizando el motor de simulación de EnergyPlus. DesignBuilder puede ser utilizado para simulaciones de muchos tipos HVAC comunes, edificios ventilados naturalmente, edificios con control de luz del día, doubles fachadas, protección solar estrategias etc. avanzadas. Los datos de simulación se pueden sacar de forma anual, mensual, diarias, cada hora o cada horas los intervalos. Los resultados son el consumo de energía por combustible y uso final. Datos del ambiente interior temperaturas operativas y radiantes y humedad media. Confort, incluyendo las curvas de distribución de temperatura, ASHRAE 55 criterios de confort, Fanger PMV, Pierce PMV ET, Pierce PMV establecido, índice de malestar de Pierce (disco), índice de Sens. térmica (TSENS) Pierce, Kansas Uni TSV. DesignBuilder es una excelente opción para el modelado de la temprano-etapa de construir diseños. El modelador avanzado OpenGL proporciona un entorno en el cual se visualizan gráficamente varias opciones de confort y consumo de energía. DesignBuilder se puede utilizar con Energy plus para simulaciones más avanzadas, pero el módulo de análisis de fluidos es limitado y no proporciona la capacidad de simular condiciones exteriores y elementos vegetales, a pesar de disponer de un módulo de cubierta ajardinada, que principalmente está pensado para tener en cuenta la diferente conductancia e inercia térmica del sistema de cubierta ajardinada.

### IES Virtual Environment

Esta herramienta permite el diseño y operación de edificios confortables que consumen mucha menos energía. Permite a los diseñadores probar distintas opciones, identificar mejores soluciones pasivas, comparar tecnologías bajas en carbono y renovables, y sacar conclusiones sobre la energía, las emisiones de CO<sub>2</sub> y confort de los ocupantes. Hay varias herramientas en el programa; cada uno diseñado para proporcionar análisis sostenible a niveles adecuados para el diseño en las diferentes etapas de diseño. El motor de simulación térmica dinámica es Apache y tiene enlaces

directos a las importaciones IFC y dxf<sup>TM</sup> de SketchUp, Revit<sup>®</sup> o Trelligence<sup>TM</sup> y gbXML. Los diferentes módulos de IES proporcionan una opción flexible para el análisis de energía, carbón, térmica, Solar, luz natural, luz, CFD, flujo de aire, HVAC, y tecnologías de bajo carbono/renovables. A pesar de sus capacidades, igual que en Energy plus o Desigh builder, el programa no tiene la capacidad de modelado en detalle del ambiente exterior ni de incluir sistemas vegetales para evaluarlos en línea con los objetivos de esta investigación.

Ningún BES tiene la capacidad para usarlo con los fines expuestos como objetivos de esta investigación, aunque sí son más fiables para el cálculo energético una vez extraídos los datos micrometeorológicos de otro programa de cálculo microclimático.

### 8.3 HERRAMIENTA ENVI-MET V4

Bruce y Fleeer, en 1998, desarrollaron un modelo programa basado en un modelo numérico tridimensional capaz de simular las interacciones entre diferentes superficies urbanas, vegetación y la atmósfera, este programa, denominado ENVI-met permite analizar los efectos de los cambios a pequeña escala en diseño urbano, como por ejemplo la inclusión de cubiertas ajardinadas en las cubiertas de edificios, en el microclima bajo diferentes condiciones climáticas de clima local o mesoescala. El objetivo era la creación de una herramienta que simplificase e hiciese más accesible la capacidad de los diseñadores de comprender y simular cuantitativamente el impacto de las decisiones de diseño urbano sobre el microclima.

ENVI-met es un modelo tridimensional de microclima diseñado para simular las interacciones superficie-planta-aire en medio urbano con una resolución típica de 0,5 m de espacio y 1 - 5 segundos en el tiempo.

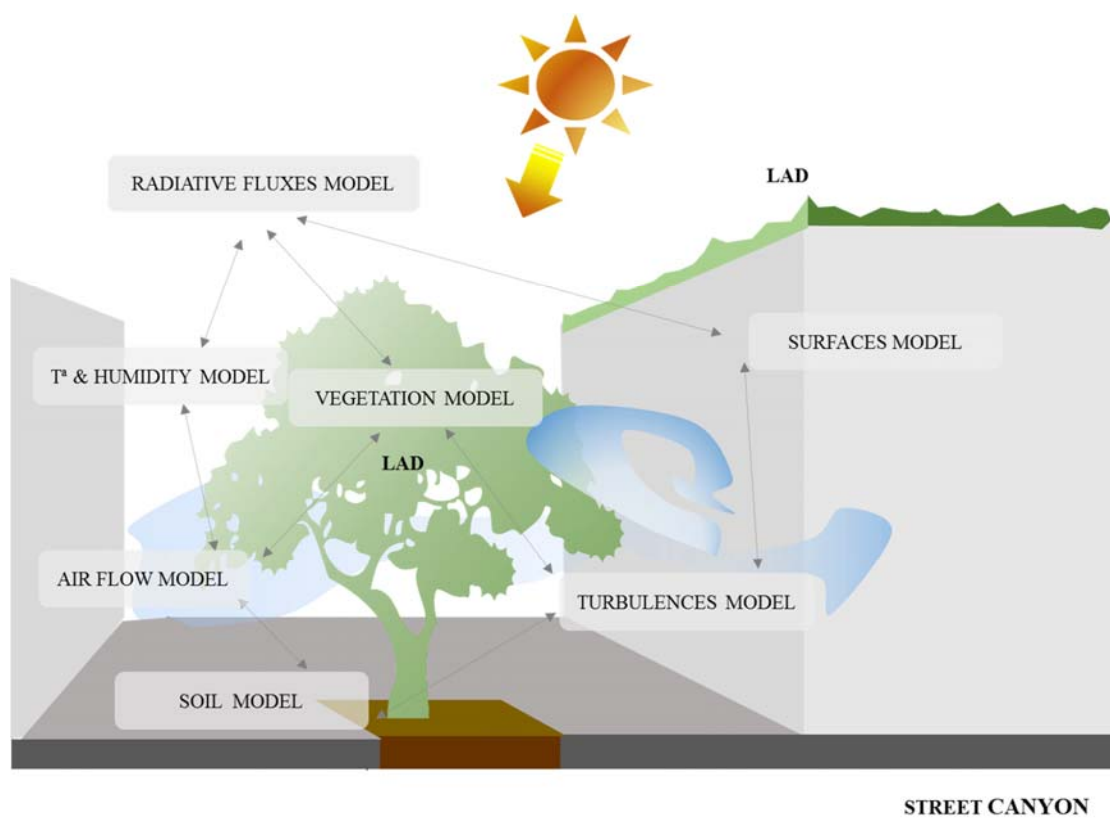
ENVI-met es un modelo de pronóstico basado en las leyes fundamentales de la dinámica de fluidos y termodinámica. El modelo incluye la simulación de:



- procesos de intercambio de flujos alrededor y entre la superficie de la tierra y las paredes del edificio
- impacto de la vegetación del microclima local
- dispersión de contaminantes

Esta herramienta permite la simulación de l microclima urbano como un sistema interactivo que consta de decenas de subsistemas dinámicos que van desde la dinámica atmosférica, física de suelos, respuesta de la vegetación hasta el clima interior del edificio. Todos los sistemas, de la hidrología del suelo a la simulación energética del edificio se calculan en un gran modelo y permitiendo que las interacciones se capturen tal y como lo hacen en un sistema natural.

El modelo propuesto de ENVI met en su primera versión se basa en el desarrollo de siete modelos dinámicos que interaccionan entre sí. Modelo de flujos de radiación, de superficies, de vegetación, de temperatura y humedad del aire, de movimiento de aire, de sustrato de la vegetación y de turbulencias.



Las siguientes secciones describen los modelos usados de acuerdo con la metodología descrita por Bruse & Fleer, (Bruse & Fleer, Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. , 1998).

---

### Modelo de movimiento de aire

Las ecuaciones que definen el movimiento de un fluido turbulento que vienen dadas por las ecuaciones de Navier Stokes en la formulación de Boussinesq y la ecuación de continuidad.

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u_i \frac{\partial u}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p'}{\partial x} + K_m \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2} \right) + f(v - v_g) - S_u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u_i \frac{\partial v}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p'}{\partial y} + K_m \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x_i^2} \right) - f(u - u_g) - S_v \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u_i \frac{\partial w}{\partial x_i} &= -\frac{\partial p'}{\partial z} + K_m \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x_i^2} \right) + g \frac{\theta(z)}{\theta_{ref}(z)} - S_w \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} &= 0\end{aligned}$$

with  $u_i=(u,v,w)$ ,  $x_i=(x,y,z)$  for  $i=1,2,3$

$f (= 104 \text{ s}^{-1})$  es el parámetro de Coriolis

$p'$  = perturbación de presión local

$q$  =temperatura potencial en nivel  $z$ .

La temperatura de referencia es  $q_{ref}$  y representa las condiciones ambientales de mesoescala. Este dato es proporcionado por un modelo unidimensional paralelo al modelo principal de aire. Le efecto de rozamiento de la vegetación sobre el movimiento de aire y la pérdida de velocidad que ocasiona se modela con los términos fuente,  $S_u$ ,  $S_v$  y  $S_w$ .

$$S_{u(i)} = \frac{\partial p'}{\partial x_i} = c_{d,f} LAD(z) \cdot W \cdot u_i$$

Donde:

$W=(u^2 + v^2 + w^2 )^{0.5}$  es la velocidad media del viento a la altura  $z$

$LAD(z)$  es la densidad de área de hoja [ $m^2 m^{-3}$ ] de la planta en esa altura.

El coeficiente de arrastre mecánico en planta los elementos  $c_{d,f}$  se fija a 0,2

---

### Modelo de temperatura y humedad

la distribución de temperatura ( $\Theta$ ) y la humedad específica ( $q$ ) dentro de la atmósfera está definida por la combinación de los modelos de advección<sup>11</sup> y difusión ligados a fuentes internas

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + u_i \frac{\partial \Theta}{\partial x_i} = K_h \left( \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x_i^2} \right) + Q_h$$
$$\frac{\partial q}{\partial t} + u_i \frac{\partial q}{\partial x_i} = K_q \left( \frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} \right) + Q_q$$

Igual que en las ecuaciones de momento, los términos  $Q_h$  y  $Q_q$  se utilizan para representar los intercambios de calor y vapor en la superficie de la planta con el modelo atmosférico. Los valores de  $Q_h$  y  $Q_q$  vienen dados por el modelo de vegetación descrito.

---

### Modelo de turbulencia

ENVI-met puede usar varios modelos de turbulencia,  $k$ - $\epsilon$  y el  $k$ - $\omega$ . El modelo, introduce dos ecuaciones adicionales que representan la turbulencia local ( $E$ ) y el radio de disipación ( $\epsilon$ ).

$$\frac{\partial E}{\partial t} + u_i \frac{\partial E}{\partial x_i} = K_E \left( \frac{\partial^2 E}{\partial x_i^2} \right) + Pr - Th + Q_E - \epsilon$$
$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} = K_\epsilon \left( \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial x_i^2} \right) + c_1 \frac{\epsilon}{E} Pr - c_3 \frac{\epsilon}{E} Th - c_2 \frac{\epsilon^2}{E} + Q_\epsilon$$

Los coeficientes del modelo  $k$ - $\epsilon$  vienen dados por Launder and Spalding;  $c_1=1.44$   $c_2=1.92$  and  $c_3=1.44$  (Launder B.E. and Spalding, 1974). La influencia de los esfuerzos cortantes ( $Pr$ ) y las fuerzas térmicas ( $Th$ ) viene dada por:

---

<sup>11</sup> Indica la variación térmica que experimenta un punto debida a que este llegando viento que arrastra aire a diferente temperatura

$$Pr = K_m \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad \text{and} \quad Th = \frac{g}{\theta_{ref}(z)} K_h \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Las turbulencias generadas en cascada a diferentes escalas alrededor de las hojas de los elementos vegetales se calcula como:

$$Q_E = c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 4c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot E$$

$$Q_\varepsilon = 1.5c_{d,f} LAD(z) \cdot W^3 - 6c_{d,f} LAD(z) \cdot |W| \cdot \varepsilon$$

Los coeficientes de intercambios en el flujo turbulento usados en las ecuaciones 4 y 5 se calculan asumiendo una turbulencia local isotrópica<sup>12</sup> de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$K_m = K_h = K_q = c_\mu \frac{E^2}{\varepsilon}; \quad K_E = \frac{K_m}{\sigma_E}; \quad K_\varepsilon = \frac{K_m}{\sigma_\varepsilon}$$

Dónde  $c_\mu=0.09$ ,  $\sigma_E=1$  and  $\sigma_\varepsilon=1.3$

---

### Modelo de flujos radiativos

La modificación de los flujos de energía radiativa es el factor más importante el microclima de entornos urbanos. Para definir este modelo, ENVI-met utiliza un algoritmo complejo de trazado de rayos desarrollado por Bruse para estimar la modificación de los flujos radiativos en cada punto de las celdas del modelo. Los resultados se almacenan como coeficientes reductores ( $\sigma$ ) que van desde 1 para los flujos que no se modifican a 0 para una absorción total de radiación. ENVI-met define cinco coeficientes de reducción para caracterizar los diferentes flujos radiativos:

---

<sup>12</sup> Invariante con respecto a las rotaciones

- a.  $\sigma_{sw,dir}(z) = \exp(F \cdot LAI^*(z))$
- b.  $\sigma_{sw,dif}(z) = \exp(F \cdot LAI(z, z_p))$
- c.  $\sigma_{lw}^{\downarrow}(z, z_p) = \exp(F \cdot LAI(z, z_p))$
- d.  $\sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z) = \exp(F \cdot LAI(0, z))$
- e.  $\sigma_{svf}(z) = 1/360 \sum_{\pi=0}^{360} \cos \lambda(\pi)$

Estos coeficientes describen la influencia de la vegetación en radiación de onda corta (a) directa y (b) difusa y en el flujo de radiación de onda larga (c) hacia abajo y (d) hacia arriba. LAI es el índice de área de hoja vertical unidimensional de la planta de nivel  $z$  en la parte superior de la planta en  $z_p$  o la tierra  $z = 0$  y resulta de la integración del LAD.

$$LAI(z, z + \Delta z) = \int_{z'}^{z' + \Delta z} LAD(z') dz'$$

Para la componente de radiación directa, el  $LAI^*$  se calcula con respecto al ángulo de la incidencia de los rayos del sol incidente. Si un edificio se encuentra entre el punto de cálculo y el sol,  $\sigma_{sw, dir}$  se define como 0 (= sombra). El coeficiente (e) describe la obstrucción local del cielo por edificios ("Sky View Factor") y va desde 1 (cielo visible totalmente) a 0 (no hay cielo visible).  $\Lambda$  es el ángulo de obstrucción máxima calculado por el modelo de trazado de rayos para una determinada dirección  $\pi$ .

Con estos coeficientes, los flujos radiativos locales pueden calcularse para cada punto de la red definida en el dominio del modelo según la siguiente ecuación:

$$R_{sw}(z) = \sigma_{sw,dir}(z)R_{sw,dir}^0 + \sigma_{sw,dif}(z)\sigma_{svf}(z)R_{sw,dif}^0 + (1 - \sigma_{svf}(z))R_{sw,dir}^0 \cdot \bar{a}$$

Dónde,  $R_{sw,dir0}$  and  $R_{sw,dif,0}$  son los componentes de la radiación directa y difusa en la parte superior del modelo. El último término considera el reflejo de la radiación de onda corta desde la pared hacia el entorno considerando un albedo promedio de la pared  $\bar{a}$ .

En el caso de la radiación de onda larga se supone que las capas de vegetación absorberán parte del flujo radiativo y la sustituirán por su propia emisión de radiación de onda larga. Dependiendo de la temperatura y la distribución de la vegetación, los flujos de la onda larga resultante pueden ser mayores o menores que en zonas sin protección vegetal. La influencia de los edificios se tiene en cuenta mediante la adición de fundentes adicionales ponderados con el factor de visión del cielo. Usando estos coeficientes reductores, los flujos hacia arriba y hacia abajo en el nivel z se definen como:

$$R_{lw}^{\downarrow}(z) = \sigma_{lw}^{\downarrow}(z, z_p) R_{lw}^{\downarrow,0} + (1 - \sigma_{lw}^{\downarrow}(0, z)) \epsilon_f \sigma_B \bar{T}_{f+}^4 + (1 - \sigma_{svf}(z)) \epsilon_w \sigma_B \bar{T}_w^4$$

$$R_{lw}^{\uparrow}(z) = \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z) \epsilon_s \sigma_B T_0^4 + (1 - \sigma_{lw}^{\uparrow}(0, z)) \epsilon_f \sigma_B \bar{T}_{f-}^4$$

Aquí  $T_{f+}$  y  $T_{f-}$  son las temperaturas medias de las hojas de las capas de vegetación superior e inferior a cada superficie,  $T_0$  es la temperatura de la superficie en el punto analizado y  $T_w$  la temperatura de la pared media considerando todas las paredes 'vistas' desde el punto de la red analizado. La emisividad de las hojas, de la superficie del terreno y de las paredes vienen dadas por  $\epsilon_f$ ,  $\epsilon_s$  y  $\epsilon_w$ ,  $\sigma_B$  es la constante de Stefan-Boltzman.

---

### Modelo del suelo

En el entorno urbano podemos encontrar materiales y tipos de suelo muy diferentes. Para permitir una simulación precisa, el programa permite seleccionar las propiedades termodinámicas e hidráulicas específicas para cada celda de la malla que define las superficies de suelo. En esta malla, la transferencia de calor (T) y el contenido de humedad volumétrica ( $\eta$ ) se calculan en formato unidimensional para una columna vertical de suelo según las ecuaciones:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_h$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = D_\eta \frac{\partial^2 \eta}{\partial z^2} + \frac{\partial K_\eta}{\partial z} - S_\eta(z)$$

Donde;

$\kappa_s$  es la difusividad térmica que es función del contenido de humedad  $\eta$  para suelos naturales, y es una constante dependiente de cada tipo de material para suelos artificiales.

$Q_h$  es una fuente de calor adicional para permitir el modelado de cuerpos de agua. Este término representa la absorción de radiación de onda corta en el medio acuoso. Esta formulación permite el modelado de cuerpos de agua estáticos (piscinas, lagos), en el medio urbano, no con movimiento (ríos, mares,...). Para terrenos naturales, la conductividad hidráulica  $K_\eta$  y la difusividad  $D_\eta$  se calculan usando la fórmula de Clapp y Hornberger (Clapp & Hornberger, 1978). No se permite el movimiento de agua en terrenos sellados. La pérdida de agua a través del suelo por la absorción del agua a través de las raíces de las plantas viene dada por un término sumidero  $S_\eta$  y que se deriva del modelo de vegetación.

---

### Modelo de vegetación

La vegetación en ENVI-met se modela como una columna unidimensional con altura de  $z_p$  con un perfil de densidad de área de hoja normalizada dada (LAD) y un perfil de densidad de raíz (RAD). Este esquema es universal y puede ser utilizado para pequeñas plantas como la hierba en las cubiertas ajardinadas, así como por grandes árboles. Las interacciones entre las hojas de las plantas y el aire circundante se expresa en términos de intercambio de flujo de calor directo ( $J_{f,h}$ ), el flujo de evaporación ( $J_{f,evap}$ ) y el flujo de transpiración ( $J_{f,trans}$ ):

$$\begin{aligned} J_{f,h} &= 1.1r_a^{-1}(T_f - T_a) \\ J_{f,evap} &= r_a^{-1}\Delta q\delta_c f_w + r_a^{-1}(1 - \delta_c)\Delta q \\ J_{f,trans} &= \delta_c(r_a + r_s)^{-1}(1 - f_w)\Delta q \end{aligned}$$

Dónde:

$T_a$  y  $q_a$  son la temperatura y la humedad específica del aire circundante,  $T_f$  es la temperatura de las hojas y  $q^*$  es la humedad de las hojas y  $q^*$  el valor de saturación de  $q$  en la superficie de la hoja.

$\Delta q$  es el déficit de saturación de vapor siendo  $\Delta q = q^*(T_a) - q_a$ . El coeficiente de transferencia de calor sensible  $r_a$  se calcula con respecto a la geometría de la hoja y velocidad del viento local.

El intercambio de vapor es controlado por la resistencia estomática  $r_s$  que tiene en cuenta tipo de la planta, la disponibilidad de agua, radiación de entrada y agua contenido dentro de la zona de la raíz.  $\delta_e$  toma el valor 1 si se dan procesos de evaporación y la transpiración ( $\Delta q \geq 0$ ), si no,  $\delta_e$  se fija en 0 y sólo se permite la condensación. Se supone que sólo las partes húmedas de la vegetación pueden evaporar y, por otro lado, que sólo las partes secas transpiran. Para el cálculo se requiere la fracción de hojas mojadas dentro de cada celda.

Esto se calcula como:

$$f_w = \left( W_{\text{dew}} / W_{\text{dew,max}} \right)^{2/3}$$

Dónde  $W_{\text{dew}}$  es la cantidad de rocío en la superficie de las hojas y  $W_{\text{dew,max}}$  es su valor máximo posible ( $0.2 \text{ kg m}^{-2}$ ). La temperatura de la hoja  $T_f$  se calcula a partir del balance energético con la energía almacenada dentro de la hoja.

El modelo de vegetación se liga con el modelo atmosférico principal a través de los siguientes términos fuente/sumidero incluidos en la ecuación 3:

$$\begin{aligned} Q_h(z) &= \text{LAD}(z) J_{f,h} \\ Q_q(z) &= \text{LAD}(z) (J_{f,\text{evapo}} + J_{f,\text{trans}}) \end{aligned}$$

Para el modelo de suelo, el término sumidero de agua  $S_n$  se obtiene por medio de la distribución de la cantidad total de agua que transpira por la raíz usando el perfil de densidad de raíz RAD como factor de ponderación.



---

### Modelo de superficies (suelo/paredes)

La temperatura de las superficies de suelo y pared se obtienen resolviendo sus ecuaciones del balance de energía para. Para la superficie de la tierra,  $T_0$  puede calcularse a partir de:

$$0 = R_{sw,net} + R_{lw,net} - c_p \rho J_h^0 - \rho L \cdot J_q^0 - G$$

Dónde  $R_{sw,net}$  y  $R_{lw,net}$  son la radiación neta de onda corta y onda larga absorbida por la superficie y  $G$  es el flujo de calor a través del suelo desde la parte más profunda. Para las superficies de pared,  $G$  se sustituye por la transmisión de calor a través de las paredes, que está en función de la diferencia entre la temperatura interior y exterior y del aislamiento de la pared. Para calcular el flujo de calor latente, el  $q_0$  de la humedad superficial debe calcularse en paralelo a la temperatura  $T_0$ .

Depende de la humedad del suelo en el nivel  $z=-1$ , la humedad del aire  $q_a$  y el valor de saturación  $q^*$  usando el modelo  $\beta$ :

$$q_0 = \beta q^*(T_0) + (1 - \beta) q(z = 1)$$
$$\beta = \min(1, \eta(z = -1) / \eta_{fc})$$

Dónde  $\eta_{fc}$  es la capacidad de retención de agua a nivel -1. Para superficies verticales,  $q_0$  es siempre igual a  $q_a$  y para superficies de agua  $q_0$  es siempre igual a  $q^*$ . Los intercambios turbulentos de momento, calor y vapor entre las superficies y el aire circundante se calculan utilizando la ley de Monin y Obhukov.

La herramienta de ENVI met ha sido usada en diversos estudios y tesis doctorales a lo largo de las dos últimas décadas (Yang, Zhao, Bruse, & Meng, 2013), (Yang, Zhaoa, Bruse, & Meng, 2012), (Huttner, Bruse, Dostal, & Katzschner, 2009), (Turmini, 2012). Estos trabajos, han desarrollado modelos de validación que validan la fiabilidad de la herramienta para reproducir los fenómenos microclimáticos y en especial el impacto de la vegetación. Estos trabajos han reportado así mismo diversas limitaciones del programa especialmente en lo referente a la rigidez del formato de entrada de datos y visualización, así como el tamaño de malla y celdas, que limitan la capacidad de ENVI-

met de modelar el ámbito urbano a diferentes escalas. La versión 4 de ENVI-met resuelve en gran medida la mayor parte de estas limitaciones en su versión beta.

En base al análisis realizado, la herramienta de cálculo seleccionada para esta investigación ha sido ENVI-met, en su versión 4, por ser la herramienta que mejor responde a la consecución de los objetivos de ésta tesis.

## 9. ESTUDIO TEÓRICO

El objetivo del análisis es definir el impacto sobre el microclima de las cubiertas ajardinadas sobre el cañón urbano al que afectan. Los pasos para la consecución de este objetivo comprenden la definición del sistema, el cálculo del impacto sobre el microclima y el efecto sobre el balance energético local y en los edificios.

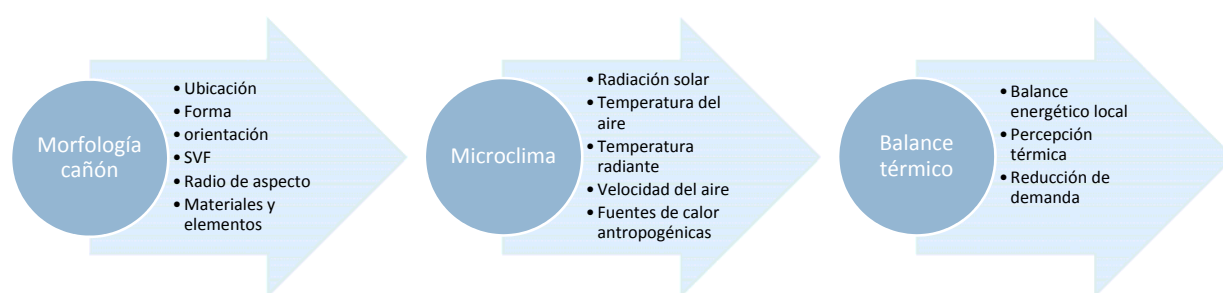


Figura 22 Proceso de análisis

### 9.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

Con el fin de estudiar el efecto de la cubierta ajardinada sobre el sistema de cañón urbano, se realiza un modelo comparativo en el que se comparan los parámetros de temperatura y humedad en tres escenarios en los que la única variante es la composición de la cubierta:

- Escenario 1: cañón urbano con cubierta de baldosas de hormigón
- Escenario 2: cañón urbano con cubierta ajardinada extensiva usando sedum como especie vegetal sobre un sustrato de 15 cm.
- Escenario 3: cañón urbano con cubierta ajardinada extensiva usando luzerne como especie vegetal sobre un sustrato idéntico al del escenario 2.

Para realizar este análisis comparativo se desarrollan tres modelos predictivos del microclima en los tres escenarios descritos, tomando como datos de entrada los parámetros climatológicos a nivel de mesoescala (datos meteorológicos de referencia locales) y el entorno urbano objeto de análisis, y como salida, los parámetros microclimáticos, con especial atención a la temperatura del aire y la humedad relativa. La estructura geométrica del cañón en los tres escenarios, así como los parámetros climáticos de referencia a escala de mesoclima, permanecen invariables.

A continuación se describen las tres componentes básicas de la estructura analizada, que nos indican la configuración general del sistema que son: [clima y ubicación](#), [trama urbana y microclima](#), que viene definido por la forma, propiedades superficiales de los materiales, límites espaciales y componentes vegetales del sistema.

Cada aspecto considera una serie de características físicas y formales que se valoran cualitativamente para generar los parámetros del sistema y que nos sirven de base para hacer la evaluación cuantitativa del impacto de la cubierta sobre el microclima. De este modo se pretende abarcar los aspectos con más peso en la definición del sistema urbano de cara a los objetivos del análisis.

El siguiente esquema define el sistema físico objeto de este estudio. El resultado del estudio será el microclima derivado del entorno físico de la calle definido, su morfología, sus elementos constituyentes y el efecto añadido de las cubiertas ajardinadas sobre éste.

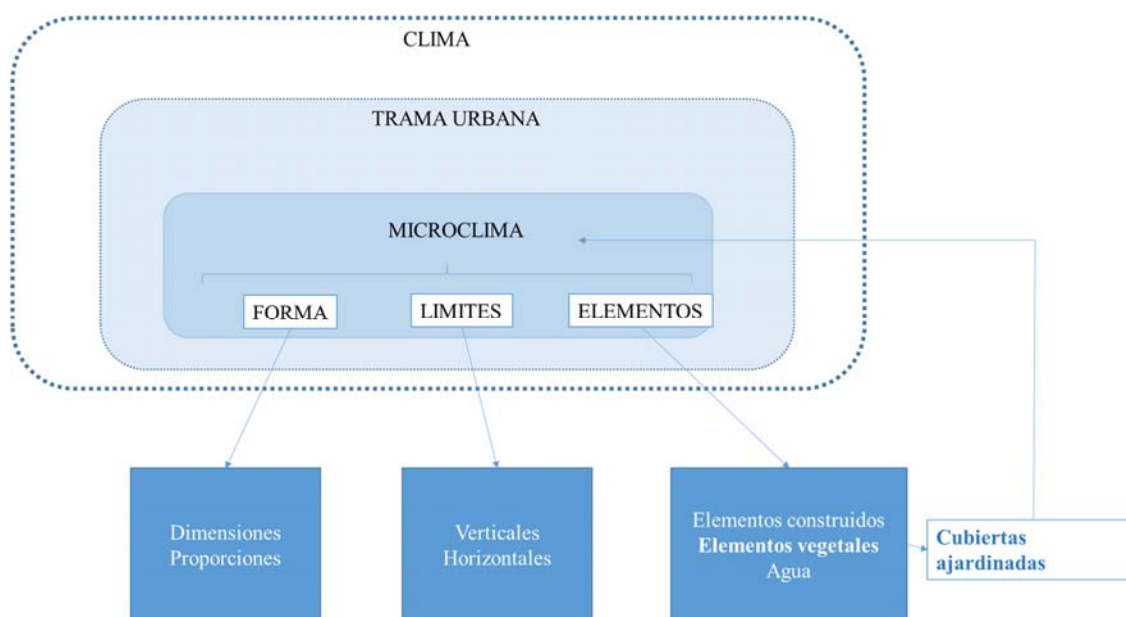


Figura 23 Sistema físico de estudio

La zona climática que marca las condiciones ambientales de referencia en el estudio es el clima mediterráneo–continental. Para este estudio se selecciona la ciudad de Madrid como representativa de este clima.

La ciudad de Madrid se encuentra en la zona central de la península ibérica, a una altura media sobre el nivel del mar de 667 m.

El clima de Madrid es un Clima mediterráneo continental y en su núcleo urbano está muy influido por las condiciones urbanas. De acuerdo con los criterios de la clasificación climática de Köppen el clima de Madrid es de tipo **Csa**, mediterráneo (Hufty, 2001), caracterizado por ser un clima templado y lluviosos con veranos secos y cálidos. La temperatura media (periodo de referencia: 1981-2010) se sitúa alrededor de los 14,5 y 15 °C.

De acuerdo con los registros del AEMET (AEMET A. E., Guía resumida del clima en España (1981-2010), 2012), los inviernos son fríos, con temperaturas medias en el mes más frío (enero) de alrededor de los 6 °C, heladas frecuentes y nevadas ocasionales (entre 2 y 5 días de nieve al año, dependiendo de la zona). En este mes las temperaturas máximas medias apenas superan los 10 °C, y las mínimas se sitúan entre 0 y 3 °C. Por el contrario, los veranos son calurosos. Los

meses más cálidos son julio y agosto, siendo julio ligeramente más cálido. En este mes, las medias superan los 25 °C, con temperaturas máximas medias de entre 32 y 33,5 °C y temperaturas mínimas medias de alrededor de los 17 a 19 °C. La amplitud térmica reducida en el centro de la ciudad por el efecto antrópico (bajando incluso de los 10 °C). La amplitud térmica anual es alta (entre 19 y 20 °C, cifra propia de la Meseta Sur) como consecuencia de la gran distancia al mar y la altitud (en torno a los 650 metros).

Las precipitaciones anuales se sitúan alrededor de los 400 mm, con un mínimo marcado en verano (especialmente en julio y agosto). El máximo de precipitación se da en otoño (de octubre a diciembre) y en los meses primaverales de abril y mayo. Destaca también la ausencia en general de grandes cantidades de precipitación en pequeños periodos de tiempo como ocurre en otras zonas de la costa peninsular mediterránea, siendo así excepcional que caigan más de 50 mm de precipitación en un día. Así, menos de una vez al año caen más de 30 mm en un día. La humedad media a lo largo del año se sitúa al rededor del 57%, con una gran oscilación entre las épocas frías, mucho más húmedas, y las cálidas, que resultan muy secas. La velocidad media del viento a lo largo del año se sitúa entre 7 y 10 km/h.

El gráfico a continuación muestra los valores medios mensuales de las principales variables climatológicas para Madrid.

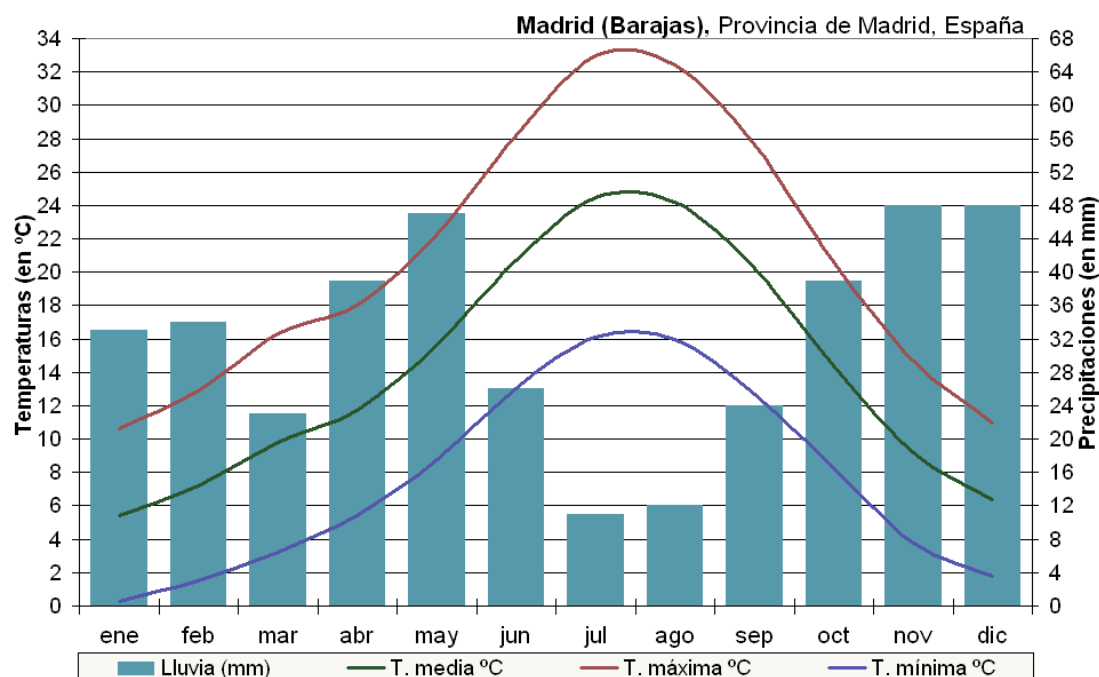


Figura 24 Valores medios de variables climatológicas. Fuente: AEMET periodo 1981-2010

Como se ha comentado en la introducción, según los estudios incluidos en el Plan de Energía y Cambio Climático desarrollado por el ayuntamiento de Madrid (Madrid, 2014) y en los escenarios de cambio climático regionalizados (AEMET A. E., 2009) para el clima de esta ciudad en el 2050, bajo el escenario de emisiones A2<sup>13</sup> se pronostican variaciones que afectarán significativamente los patrones climáticos observados a lo largo de las últimas décadas. Se espera una disminución de la media anual de precipitaciones de hasta un 20%, unido a un incremento entre 2,5 y 3° C de la media mensual anual de las temperaturas mínimas diarias (un 27%) y un incremento entre 3,5 y 4° C de la media mensual anual de las temperaturas máximas (un 21%). La siguiente tabla muestra los valores extremos de variables climáticas de Madrid registradas entre 1920 y 2015 para poder ver la evolución de los patrones.

<sup>13</sup> Para reducir la incertidumbre y describir de una manera coherente la evolución de los factores que determinará la concentración de Gases Efecto Invernadero en la atmósfera el Panel de Expertos en Cambio Climático (IPCC) han diseñado una serie de escenarios concebidos como imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro. El **escenario A2** describe un mundo muy heterogéneo basado en la preservación de las identidades locales. Los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, lo que se traduce en un aumento de población constante. El desarrollo económico está orientado regionalmente, y el crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico difiere de unos países a otros

Tabla 10 Valores extremos de variables climáticas de Madrid ( 1920-2015)

Observatorio de Madrid Barajas													
Variable	Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sept	Oct	Nov	Dic
<b>Tª máxima absoluta (°C)</b>	42.2	20.9	24.5	27.1	31.7	36.5	40.0	42.2	41.2	40.2	31.7	24.7	21.3
	1995	2003	1960	2015	1945	2015	2015	1995	1991	1988	2011	2009	1979
<b>Tª mínima absoluta (°C)</b>	-15.2	-15.2	-14.8	-6.6	-4.0	-0.5	3.9	7.0	7.4	1.9	-2.4	-7.4	-10.5
	1945	1945	1963	2005	1973	1991	1975	1997	1977	1974	1974	1988	2001
<b>Tª media mensual más alta (°C)</b>	28.9	8.2	10.1	12.8	16.2	19.7	25.4	28.9	27.0	23.1	18.0	12.3	9.5
	2015	2014	1990	1997	2014	2006	2005	2015	2009	1985	2014	2006	1989
<b>Tª media mensual más baja (°C)</b>	1.2	1.2	2.0	6.2	8.4	10.7	17.4	21.0	21.3	16.7	11.6	6.4	2.3
	1945	1945	1956	1971	1986	1984	1992	1977	1977	1969	1974	1966	2001
<b>Precipitación máxima/día (mm)</b>	73.4	32.9	35.9	42.9	39.9	45.7	38.9	26.7	67.0	63.6	72.9	73.4	41.1
	1963	1979	1956	1972	1962	1962	1956	1981	1952	1972	1957	1963	1958
<b>Precipitación mensual más alta (mm)</b>	192.0	159.5	107.0	104.7	120.2	115.3	93.1	58.9	88.0	142.0	188.3	172.0	192.0
	1958	1970	1964	1962	1962	1959	1988	1987	1952	1972	1960	1963	1958
<b>Precipitación mensual más baja (mm)</b>	0.0	0.0	0	0.0	1.7	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6	0.1
	1988	2005	2000	1997	1970	2015	2012	2011	2014	1973	1985	1992	1988
<b>Racha máxima de viento (Km/h)</b>	122	96	100	104	100	93	98	117	100	82	122	103	100
	1972	1951	1978	1992	1985	2009	1963	1991	2015	2010	1972	1997	1980



El registro de los valores extremos actualizado con los datos del año 2015 contabilizando los registros desde el 1920, muestran anomalías (marcadas en naranja en la tabla) que se concentran en los últimos años y que podrían tener relación con los cambios que predicen los modelos climáticos. Es notable observar que varios de los registros de temperaturas máximas absolutas y medias mensuales se han producido en los últimos dos años, poniendo de manifiesto la tendencia que marcan las predicciones.

---

### Localización

El medio físico del objeto de análisis viene definido principalmente por la localización geográfica del ámbito de estudio y por los límites fijados para el sistema. Para esta fase de análisis, el límite del sistema se fija en la escala de barrio. Para ello se selecciona un emplazamiento que permita el análisis de los objetivos de estudio sin incluir variables adicionales que dificulten su consecución.

Para la realización de esta fase del estudio buscamos un espacio urbano con una trama ortogonal, con una orientación del cañón E-O, alineado con los vientos dominantes en Madrid en verano, vientos prevalentes de componente Norte y Sudoeste y una relación de aspecto de cañones de calle cercana a 1.

Según los datos climáticos para el verano, la velocidad del viento a 10 m está comprendida entre 0 y 3 m/s con componente principal 0° Norte (10% de las horas) y de 240°, Sudoeste (7% de las horas). Los vientos de componente sudoeste son más cálidos por lo que para evaluar el potencial de las cubiertas ajardinadas como estrategia de control de las temperaturas elevadas el modelo se centra en estas condiciones más desfavorables con viento a 240°.

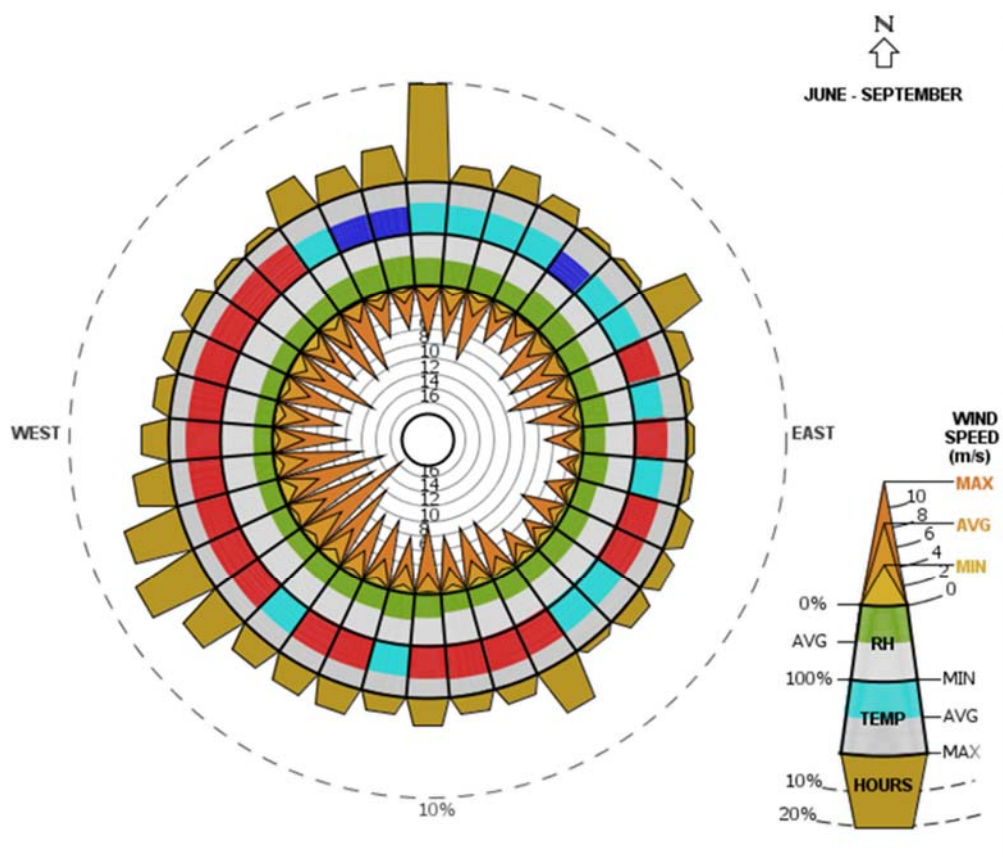


Figura 25 Rosa de vientos de Madrid para los meses de verano. Fuente: Climate consultant -base de datos climáticos de Energy Plus.ESP\_MAD\_IWEC. Epw

## 9.2 TRAMA URBANA

Tomando la acepción de Ochoa, la trama urbana se considera como el sistema básico de un núcleo urbano. La trama es un sistema complejo, que incluye aspectos combinados de energía y masa en su balance final. Se constituye por una serie de subsistemas, de características físicas y funcionales muy diferentes entre sí, que generan diversos microclimas. La vegetación dentro del sistema, contribuye en gran a la regulación de este balance, ya que como organismo vivo puede modificar los flujos de masa y energía, tanto de entrada como de salida, del sistema, afectando el balance de manera global.

El Sistema de Trama Urbana se complementa con el sistema Vegetación, y entre sus múltiples formatos (plaza, calle, calle, plaza,..) para esta fase de la investigación se ha seleccionado el sistema Calle-Plaza + Vegetación.

El entorno urbano seleccionado de acuerdo a estos criterios es el Barrio de Los Molinos en Getafe (Madrid), con ubicación geográfica 40°19'8.93"N/ 3°42'13.93"O. Esta trama urbana se aproxima al entorno físico objeto de estudio por lo que se ha constituido como la base para hacer el estudio teórico.

---

### Topografía y orientación

Los aspectos topográficos que pueden afectar más claramente el balance energético son: la altura relativa, la pendiente del terreno y su orientación (Ochoa J. M., 1999).

La altura relativa se refiere a la altura de una localidad con respecto a las zonas que la rodean, esta puede ser en depresión, igualdad o en prominencia. Un emplazamiento en prominencia está más elevado que sus alrededores, y por tanto más expuesto a los cambios climáticos; vientos que inciden con mayor fuerza y mayor radiación por la ausencia de obstrucciones. Esto resulta en oscilaciones térmicas más acentuadas, pero también ofrece más posibilidades para la implementación de estrategias de ventilación e iluminación natural y captación de la energía del sol como fuente renovable.

Por el contrario en una localidad que se encuentre en depresión, las posibilidades de ventilación e iluminación natural serán menores, aunque, en lugares con vientos muy fuertes, resulta favorable para evitar el impacto del viento y los cambios climáticos bruscos.

La pendiente es el otro componente topográfico fundamental y se caracteriza por su inclinación y su orientación. Los parámetros climáticos afectados son la radiación solar y la incidencia de los vientos dominantes. Un terreno inclinado hacia el sur (en el hemisferio norte) recibirá más radiación solar, cuánto más alta sea su latitud, sobre todo en invierno. (Ochoa J. M., 1999). En cuanto a los vientos si un emplazamiento está orientado de cara a los vientos dominantes, tendrá

más posibilidades de ventilación que el que se encuentre del otro lado protegido. Así mismo, las ubicaciones cercanas a pendientes fuertes, experimentan corrientes de aire de carácter cíclico entre el día y la noche, debido a la diferencia de temperatura entre los diferentes puntos de la pendiente.

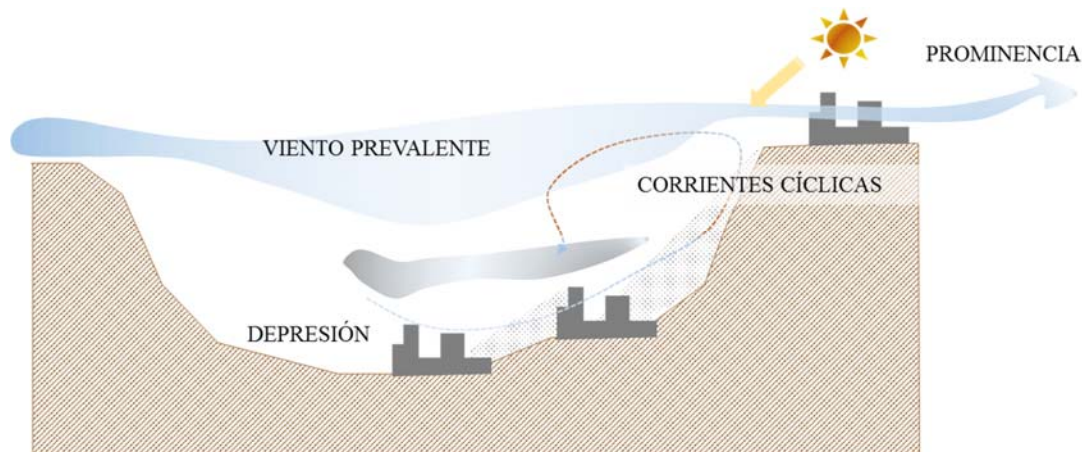


Figura 26 Influencia de la topografía en el microclima. Fuente:Elaboración propia adaptada de Ochoa. (Ochoa J. M., 1999).

La ubicación seleccionada es un barrio de carácter residencial, con un trazado de viales ortogonal, de dimensiones en torno a los 15-20 m de ancho y asentada en un terreno llano y en altura en relación a su entorno próximo, una zona expuesta en la que el régimen de vientos de la zona no se ve afectado por construcciones u otro tipo de obstrucciones. Su orientación es E-O para los ejes principales del desarrollo, de dimensiones y N-S para los secundarios.

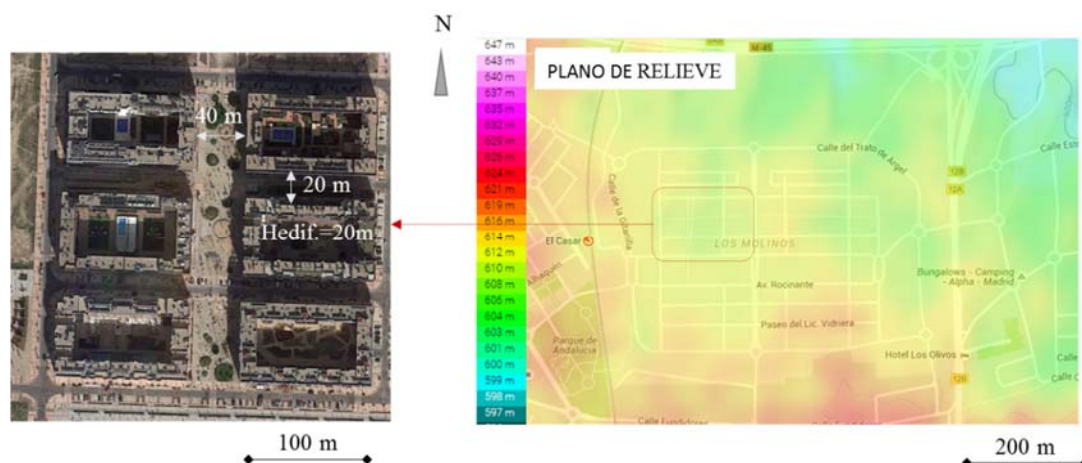


Figura 27 Trama urbana del estudio teórico. Barrio de los Molinos, Getafe.

Su ubicación cercana a la base aérea de la ciudad de Getafe, impone una limitación en altura a las viviendas que en ningún caso superan los 20 m de altura, por lo que la relación de aspecto H/W de todo el desarrollo se mantiene cercana a 1. Su carácter residencial, con tráfico limitado y una densidad baja por parcela ( $2,8 \text{ m}^2 / \text{m}^2$ ), organizados en manzanas cerradas con patio vecinal limita el factor antrópico en el balance energético global de la trama (Taha H. , 1997).

### 9.3 MICROCLIMA

En la definición del microclima del entorno de estudio se analizan los siguientes factores: forma, , límites espaciales, las propiedades superficiales de los materiales que los conforman, y componentes vegetales del sistema.

---

#### Forma

El tipo de forma urbana influye principalmente en la distribución del viento dentro de la trama y en su soleamiento. En general las zonas con calles irregulares e interrumpidas, tienen condiciones con menos ventilación que las más abiertas y regulares. Las zonas más uniformes, pueden presentar situaciones cambiantes, dependiendo de la orientación, en relación al sol y dirección de los vientos dominantes.

La forma, viene dada por las dimensiones geométricas de los volúmenes y espacios intersticiales que configuran el entorno urbano. La sección media de las calles es el aspecto de diseño que se refiere a la relación entre la anchura y la altura de las calles y plazas que componen la trama urbana que rodea al sitio de estudio. Este parámetro junto con la definición del largo de la trama y orientación respecto al sol y a los vientos dominantes determinan sus implicaciones climáticas.

### 9.4 CASO DE ESTUDIO

El sistema urbano analizado, es entramado de calles con una sección media caracterizada por H/W comprendido entre 0,5-1. La relación entre el largo de la calle y la altura de la edificación L/H es

de 5. De acuerdo con la clasificación de cañones urbanos hecha por Vardoulakis y otros, la estructura de la trama objeto de estudio entra dentro de la definición de cañón urbano y se clasifica como “Cañón regular” (  $H/W \sim 1$  ) y en las calles principales, como “Avenida cañón” (  $H/W < 0,5$  ), (Vardoulakis, Fisher, Pericleous, & Gonzalez-Flesca, 2003).

En cuanto a la relación altura de edificios-largo del cañón (distancia entre dos intersecciones), la relación que guarda el ámbito de estudio es  $L/H \sim 5$ , clasificándose como un cañón medio.

El SVF viene dado por la fórmula (1):

$$SVF = \frac{[1 + \cos(\tau)]}{2} = \cos^2\left(\frac{\tau}{2}\right)$$

Para la trama de estudio el SVF varía entre 0,75 para el caso de cañón avenida ( $H/W=1$ ) y 0,64 para el caso de cañón regular  $H/W=0,5$ .

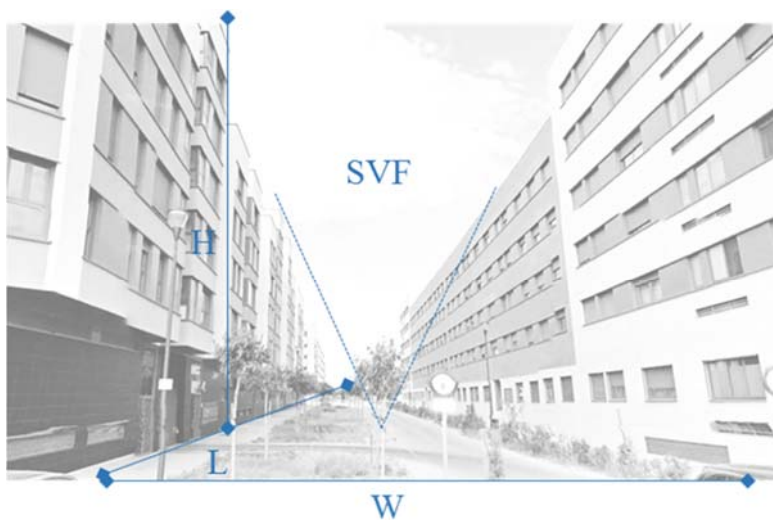


Figura 28 Trama urbana de estudio y parámetros geométricos.

EL cañón que genera esta estructura urbana se caracteriza por un régimen de vientos de tipo vórtice para las vías de la trama con un radio de aspecto  $H/W \geq 1$  (esquema c.) y de intersección de estelas y turbulencias para las vías con un radio de aspecto  $0,5 < H/W < 1$  (esquema b.)

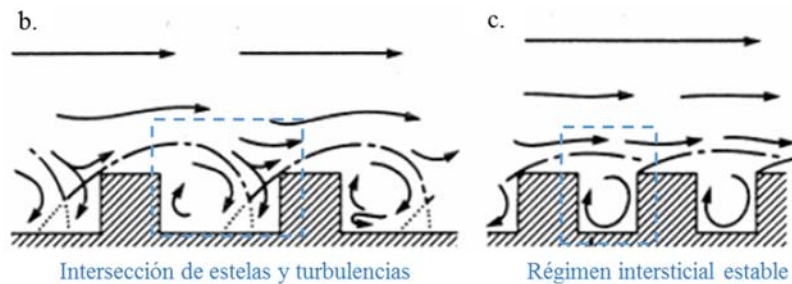


Figura 29 Tipos de flujo de aire según relación de aspecto. b.  $H/W < 1$ ; c.  $H/W \geq 1$ . Fuente: (Oke T. , 1988).

De acuerdo con los análisis realizados por Gerogiakis y Santamouris, (Georgakis & Santamouris, 2005), para el rango de velocidades y dirección de viento medias en Madrid en los meses de verano, entre 0 y 3 m/s y dirección prevalente del Sudoeste. De acuerdo a Depaul & Sheih, el límite de velocidad para mantener un régimen estable de vientos en un cañón con radio de aspecto 1 está en torno a 1 m/s, (Depaul & Sheih, 1986), por debajo de este flujo el régimen es inestable y presenta mayor dificultad de análisis.

## Límites espaciales

La configuración de los límites que definen el sistema de análisis es otro de los factores que condicionan el microclima del entorno. Como límites, se entienden las superficies que lo confinan tanto en sentido vertical como horizontal.

### Límites verticales

Los límites verticales en el caso de un espacio exterior, se refieren a los elementos que le dan forma y “cierran” sistema, tanto si son elementos naturales (accidentes topográficos), como si son elementos construido. Estos cerramientos, influyen sobre todos los parámetros ambientales, por lo que es muy importante definir sus características físicas y formales para poder realizar una evaluación cuantitativa de sus efectos.



### Límites horizontales.

Los límites horizontales definen el sistema en sentido vertical, en el caso de los espacios abiertos solo existe el límite inferior, ya que el superior sería el cielo que afecta en relación a su cobertura ( despejado, nuboso,..). El pavimento y el terreno natural constituyen los límites horizontales del entorno urbano, y al igual que en los límites verticales, sus características físicas condicionan el microclima urbano.

En el terreno natural, es especialmente importante su porosidad y capacidad de retención de agua, ya que este factor es determinante en la humedad ambiental y también afecta a la. Así mismo, su contenido de humedad varía su capacidad térmica y conductividad, afectando a la inercia térmica global del sistema. La tabla siguiente, resume algunos de los aspectos formales de los cerramientos con mayor incidencia sobre el microclima que generan.

Tabla 11 Parámetros de los límites influyentes en el microclima.

Propiedades físicas de los elementos que confinan el sistema	
Permeabilidad	Varían el porcentaje de radiación y viento que lo traspasa. Una perforación = 0 se refiere a un elemento opaco y de 1, a un elemento abierto.
Inercia Térmica	Depende de la capacidad calorífica del material componen el sistema y representa la capacidad del cerramiento para almacenar calor. Este calor almacenado será liberado a los ambientes más fríos hasta alcanzar el equilibrio térmico (ej, calor almacenado durante el día e irradiado durante la noche).
Albedo	Es la capacidad de una superficie para absorber o reflejar la radiación solar, por lo que sus implicaciones serán básicamente lumínicas y climáticas. Un albedo de 1,0 se refiere a una superficie que refleja el 100% de la radiación solar, mientras que con uno de 0,0 la absorbe toda. Los colores claros tienen un albedo más alto que los colores oscuros.
Textura	Es grado de rugosidad de la superficie. Con mayor rugosidad las reflexiones luminosas son por lo general más difusas, con poca rugosidad hay la posibilidad de reflexiones especulares.
Orientación	Afecta en la medida de cómo se altera el curso de los vientos dominantes, y en qué medida absorbe, obstruye o refleja la radiación solar.



Los límites del caso de estudio los configuran las fachadas de los edificios residenciales que confinan el cañón urbano, el suelo, y el cielo. Las fachadas de los edificios son de ladrillo y piedra, con un porcentaje de superficie acristalada en torno al 25%. El suelo, se compone de aceras de baldosas de hormigón y pavimento asfáltico en los viales. La proporción de acera respecto al ancho del vial es de 1/5. Las cubiertas de los edificios son planas, por lo que no hay límites inclinados y la delimitación del sistema es un prisma abierto en su cara superior al cielo.

El albedo medio se ha calculado promediando la superficie de cada material y de acuerdo a sus albedos individuales. La tabla siguiente muestra albedos típicos de los materiales de construcción presentes en el caso de estudio.

Tabla 12 Albedo de materiales de construcción. Fuente: Elaboración propia basada en ensayos de diferentes materiales según standard ASTM<sup>14</sup>:

Material	Albedo %
Ladrillo rojo	18
Asfalto	15
Piedra blanca	50
Hormigón (curado)	55
Tierra seca	14
Ladrillo amarillo	52
Aluminio	85

<sup>14</sup> EL SRI se calcula según ASTM E 1980. La reflectancia se mide según ASTM E 903, ASTM E 1918 o ASTM C 1549. La emitancia se mide según ASTM E408 o ASTM C 1371.

El siguiente gráfico muestra los límites que definen el cañón sobre el que se evalúa el microclima en caso de estudio y sus propiedades físicas.

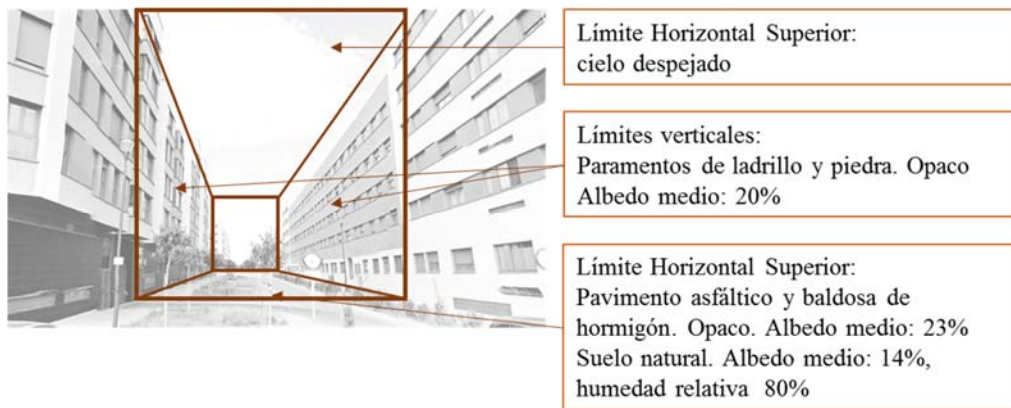


Figura 30 Límites del Sistema

Los límites horizontales se han considerado adiabáticos para evitar las interferencias de las temperaturas interiores en los edificios sobre el microclima.

Dentro de los límites del sistema aunque fuera del ámbito del cañón, se incluyen también las cubiertas de los edificios circundantes como elementos que influyen en el microclima generado en el cañón urbano y que son la base del elemento vegetal cuya influencia se analiza en esta investigación, la cubierta ajardinada.

La cubierta de referencia seleccionada como base del estudio es una cubierta plana, con cobertura asfáltica convencional, opaca y con un albedo de un 15%.

---

### Elementos vegetales

Los elementos que configuran el ámbito son por un lado los elementos construidos, definidos en la sección anterior como límites del sistema, y los elementos vegetales que se incluyen como variante para evaluar su efecto sobre el microclima en el cañón.

El factor climático más afectado por los elementos vegetales es la incidencia de radiación solar sobre las superficies del sistema, evitando las ganancias solares y reduciendo la temperatura radiante. Además de proporcionar sombra, la vegetación refleja la radiación infrarroja emitida por el suelo y otras superficies, evitando así el enfriamiento radiativo.

El viento también es afectado ya que la vegetación es una obstrucción que desvía en mayor o menor medida el viento, tanto en su componente horizontal como vertical, dependiendo de las dimensiones y configuración del componente vegetal. Así mismo, su carácter permeable no permite un bloqueo del viento, sino un filtrado que reduce su velocidad.

Los efectos microclimáticos de los elementos vegetales no solo dependen de su configuración espacial, si no que están ligados a sus propiedades físicas tales como el , índice de área foliar (LAI), la densidad del follaje (LAD), el albedo y los cambios estacionales en la foliación explicados en la sección 5 del documento.

El elemento vegetal que se analiza en este estudio es la cubierta ajardinada, cuya influencia en el microclima del cañón es el objeto de esta investigación.

### Cubierta ajardinada

La cubierta ajardinada es un elemento de cobertura que cambia las propiedades físicas y ópticas del sustrato sobre el que está colocada. Tanto el albedo, como la emitancia, la inercia térmica, conductividad y rugosidad de la cubierta cambian respecto a una cubierta convencional no vegetal, y esto tiene una repercusión directa sobre el sistema, aumentando la retención de calor en el sistema por una mayor inercia térmica, variando la reflexión de la radiación solar y cambiando el balance energético global del elemento de cubierta, del edificio y del microclima que confinan.

La selección de la vegetación en la cubierta con fines de control microclimático ha sido estudiada por autores como Blanusa y otros, destacando la importancia no sólo del mantenimiento, si no del balance con los servicios que da al ecosistema una determinada especie frente a otras. Así, en su estudio de especies con mayor potencial de enfriamiento, los autores concluyeron que factores

como el color de la hora y su morfología (grosor, disposición), tenían un gran impacto en el balance energético entre la vegetación y las superficies y aire que la rodea. (Blanusa, et al., 2012)

Con este fin, la selección de especies realizada, trata de dar esta visión, centrándose en el LAD como característica determinante de cara a los objetivos de esta investigación.

Los sistemas de cubrición vegetal analizados en este estudio son de tipo extensivo<sup>15</sup>, con un sustrato vegetal de 15 cm que permite la plantación de especies alpinas como el sedum, y diferentes combinaciones de hierbas y arbustos seleccionados principalmente en función del clima, tipo de sustrato, los requisitos de mantenimiento de la cubierta, las épocas de floración y la altura de la vegetación deseada.

La tabla siguiente muestra algunos tipos de vegetación usados comúnmente en cubiertas ajardinadas en clima mediterráneo:

Tabla 13 Plantas adecuadas para cubierta ajardinada extensiva en clima Mediterráneo. Fuente: (Spala, et al., 2008)

Plant species	Flowering season	Soil type	Final height in cm
1. <i>Nerium oleander</i>	Summer–Autumn	All types	80–90
2. <i>Pyracantha</i> sp.	Spring	Well drained	60–70
3. <i>Myoporum</i> sp.	Spring	Acid	80–90
4. <i>Cotoneaster franchetti</i>	Spring	Well drained	50–70
5. <i>Hibiscus syriacus</i>	Summer–Autumn	Well drained	40–60
6. <i>Cassia corymbosa</i>	Summer–Autumn	Well drained	40–60
7. <i>Spiraea thumbergii</i>	Spring	All types	40–50
8. <i>Pyracantha</i> sp.	Summer–Autumn	All types	80–90
9. <i>Myoporum</i> sp.	Spring	Well drained	60–70
10. <i>Cotoneaster franchetti</i>	Spring	Acid	80–90

<sup>15</sup> Cubierta vegetal extensiva es aquella cuyo sustrato no excede los 20 cm de espesor.

Estas especies como las adelfas, arbustos, y otros tipos de plantas adaptadas a climas áridos o alpinos, tiene una resistencia a la exposición solar y al viento que las hacen aptas para su desarrollo en la cubierta con un mantenimiento mínimo y unas necesidades de riego bajas. Este tipo de cubiertas requieren una irrigación muy baja, cubriendo sus necesidades de riego tras la implantación meramente con la pluviometría anual.

Como ya se ha explicado previamente, uno de los factores determinantes en la selección de especies de cara al impacto sobre el microclima es el Leaf Area Density (densidad de follage) LAD. Éste parámetro se obtiene por medio de análisis empíricos para cada especie basados en mediciones in situ (Weiss, Frederic, Smith, Jonckheere, & P., 2004). Esta complejidad, hace que el LAD sea uno de los parámetros más complejos de calcular, ya que su definición requiere la identificación de la estructura tridimensional de la planta y la identificación de su composición a cada nivel de altura de la planta. La tabla siguiente proporciona ejemplos del LAD de especies comunes:

Especies	LAD ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )
Sedum	0.3
Planta herbácea	1.5
Arboles	2.5
Césped	0.2

Ejemplo de LAD para diferentes especies



Sedum



Césped



Planta herbácea



Plátano de sombra

Para la investigación, se han seleccionado especies con características físicas y requisitos de mantenimiento similares a las definidas en la tabla 8, pero con perfiles de LAD ya definidos por ENVI-met. En base a este criterio, las especies seleccionadas para modelar las diferentes variantes de cubierta ajardinada y sus LAD de acuerdo a los datos proporcionados por ENVI-met 4 han sido:

- a. Sedum, con un LAD  $0,3 \text{ m}^2/\text{m}^3$
- b. Luzerne ( Medicago Sativa), con un LAD  $1,5 \text{ m}^2/\text{m}^3$

La siguiente ilustración resume las características principales del sistema objeto de estudio:

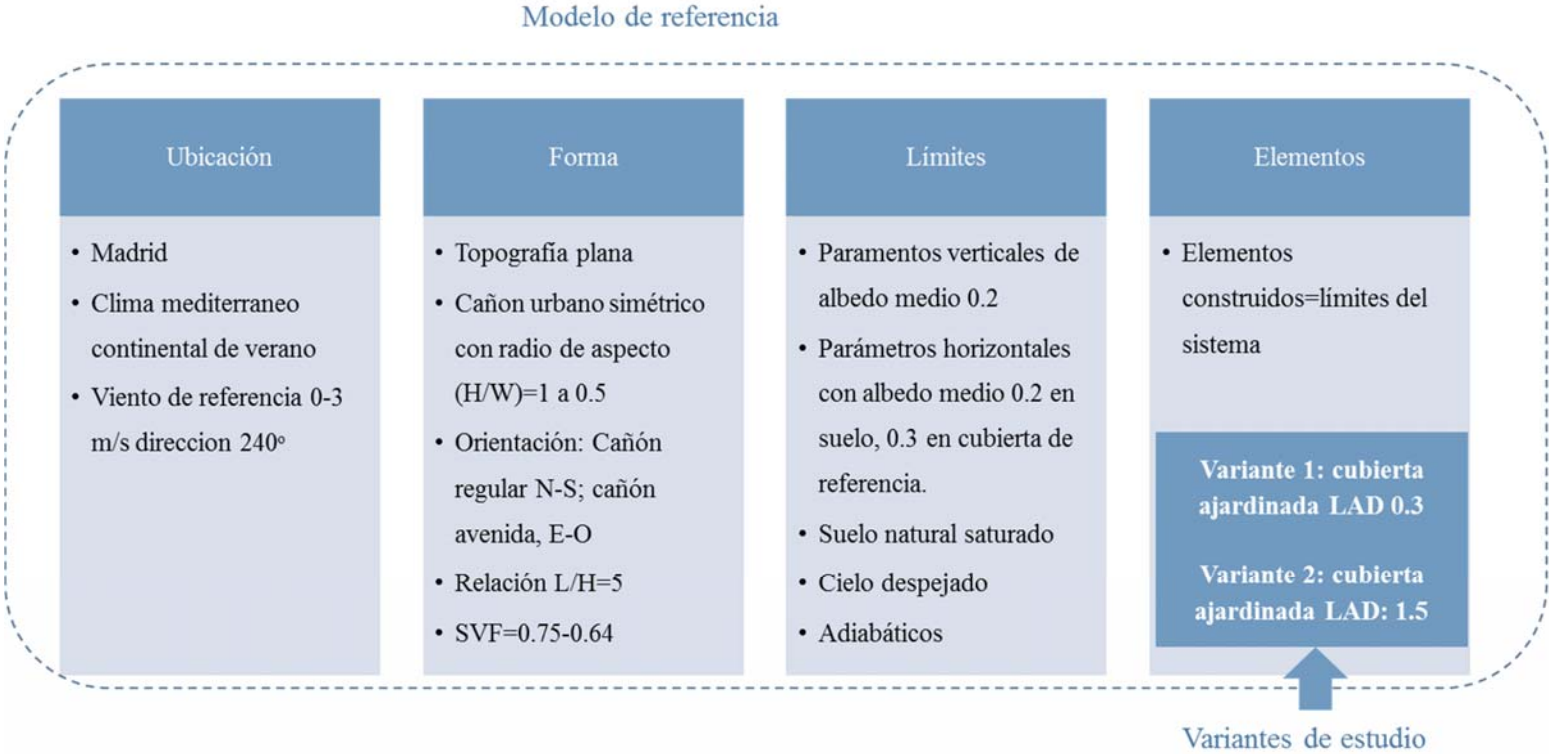


Ilustración 1 Sistema de estudio y variantes

ENVI-met es una herramienta de pronóstico, en la cual a partir de un modelo físico en 3D insertado en un modelo 1D que establece las condiciones climáticas mesoescalares, es decir, el contexto definido por los valores, perfiles de flujos y condiciones atmosféricas promedio que marcan las condiciones de partida a partir de las que se genera el modelo predictivo del microclima en el modelo 3D insertado.

La Herramienta ENVI-met 4, no es una única aplicación centralizada donde se dan las entradas del modelo. Su estructura, integra una colección de herramientas individuales que permiten que cada aspecto del modelo se desarrolle independientemente, lo que facilita las simulaciones iterativas cambiando sólo los aspectos necesarios en cada módulo. Los módulos se organizan lo que se denomina el Headquarter, dónde se interrelacionan todos los demás módulos. El diagrama siguiente proporciona el listado de las aplicaciones que componen la herramienta:

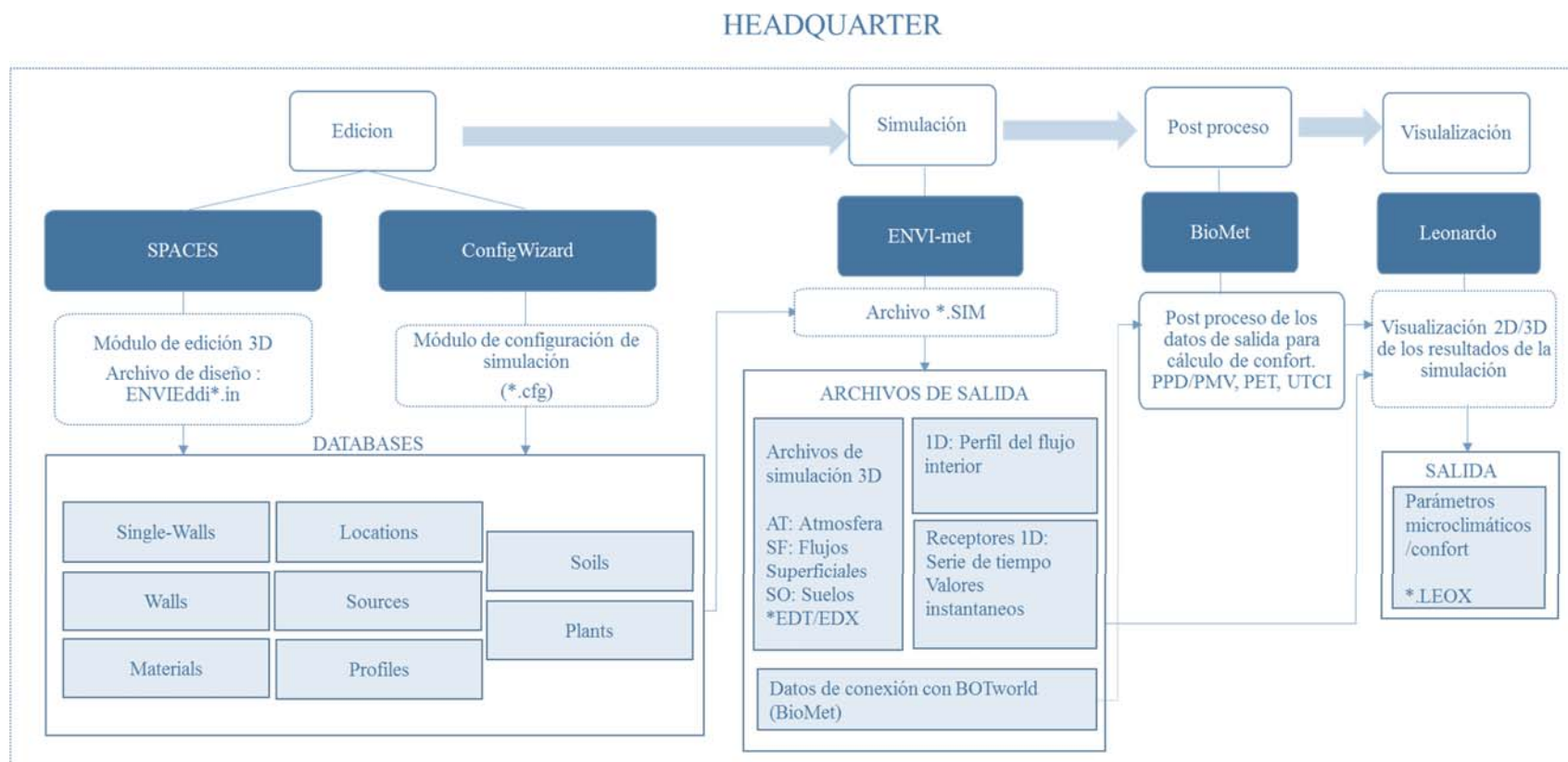


Figura 31 Estructura de ENVI-met 4



## Archivos de edición

Los datos de entrada en la herramienta se estructuran en dos grupos, el espacio físico que se gestiona a través la aplicación SPACES y los datos climáticos promedio de mesoescala, que se gestionan a través de los archivos de configuración a través del ConfigWizard.

El modelo 3D es una representación de la geometría del área de estudio del barrio seleccionado.

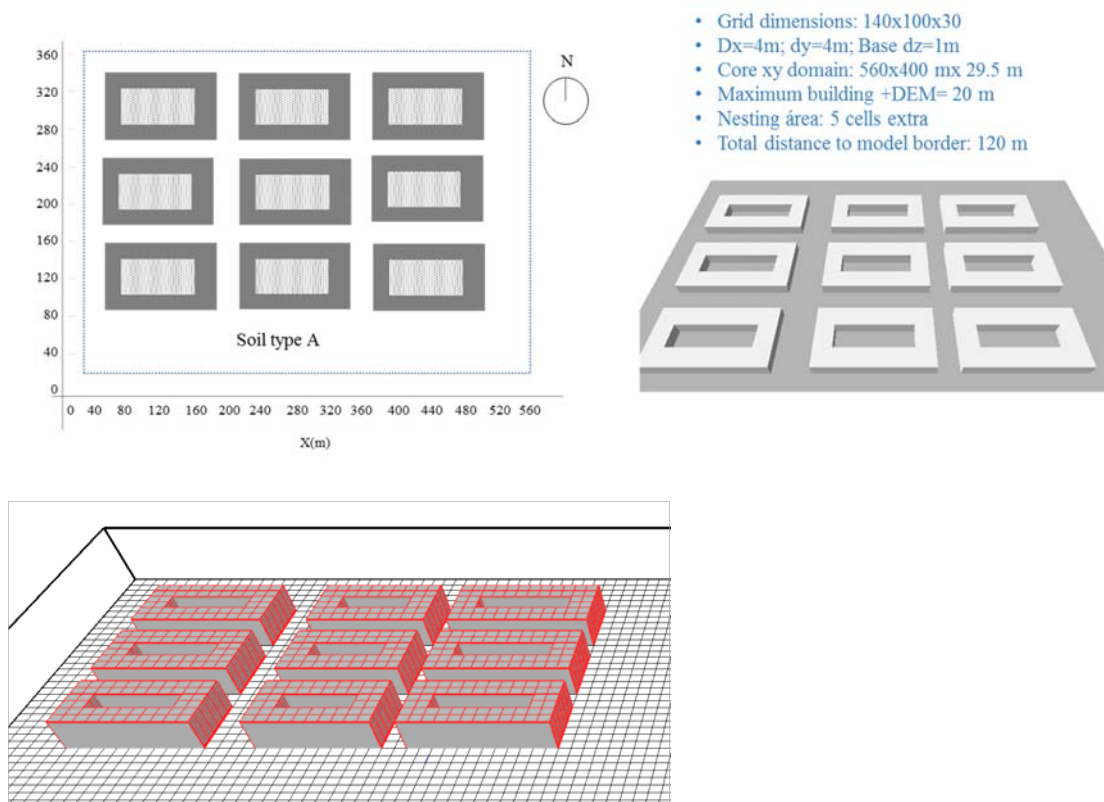


Figura 32 Modelo geométrico en ENVI-met 4

Los ajustes generales del modelo tales como el tamaño de malla, celda, tipos de superficies por defecto y localización, se introducen en los datos generales del modelo. Los datos geométricos se insertan por medio de la construcción de los bloques a partir de las celdas unidad definidas en los parámetros generales. El tipo de suelo y materiales de los edificios, se definen por defecto, pero la versión 4 de ENVI-met permite la modificación de estos parámetros sobre cada celda específica dentro del modelo, así como su visualización y edición en 3D, lo que supone una mejora sustancial

sobre las versiones anteriores en las que el modelo se desarrollaba en 2D y estos valores (geometrías y propiedades), se trasladaban en altura a todo el modelo, limitando así la creación de geometrías o las variaciones de materiales.

La siguiente pantalla muestra los datos de entrada para la geometría base del modelo de referencia.

change or create model Domain

Number of grids and nesting properties

**Model type:** Concept Design

Main model area:

x-Grids: 1.40 y-Grids: 100 z-Grids: 30

Nesting grids around main area:

Nr of nesting grids: 5

Set soil profiles for nesting grids

Soil A: [ST] Asphalt Road

Soil B: [00] Default Unsealed Soil (\*\* do not

Grid size and structure in main area

Size of grid cell in meter:

dx= 4.00 dy= 4.00 dz= 1.00 (base height)

Method of vertical grid generation:

☐ equidistant (all dz are equal except lowest grid box)

☒ telescoping (dz increases with height)

Telescoping factor (%): 0.00

Start telescoping after height (m): -3.43

Default Wall/ Roof Properties

Wall Material: [00] Concrete slab (hollow block, c

Roof Material: [R1] Roofing: Tile

Geographic Properties

**Model rotation out of grid north:** 0.00

**Location on earth**

Name of location: Madrid/Spain

Position on earth: Latitude (deg. +N, -S): 40.23

Longitude (deg. -W, +E): -3.43

Reference time zone: Name: CET/GMT+1

Reference longitude: 15.00

**Georeference**

Co-ordinate of lower left grid x-value: 15.00

y-value: 0.00

Reference system: <plane>

Reference level above sea level for DEM=0: 0.00

Model area description: A brave new area

Create new area

Apply changes

Cancel

Figura 33 Parámetros generales y dominio del modelo: ENVI-met SPACE Screenshot

El modelo de referencia usa estos parámetros en toda su estructura. Las variantes incluyen la modificación de la superficie de cubierta por medio de la inclusión de elementos ajardinados. La siguiente tabla muestra los datos de entrada para los casos analizados:

Tabla 14 Datos de entrada en ENVI-met SPACES

	Reference	Variant 1	Variant 2
Building Surface	Default properties	Default properties	Default properties
Sources	No pollutants	No pollutants	No pollutants
Soil and surface	Default properties	Default Properties	Default properties
Vegetation	No vegetation	Sedum: LAD 0.3	Luzerne: LAD 1.5
DEM	Flat surface, 0 height	Flat surface, 0 height	Flat surface, 0 height

Los datos climáticos promedio a nivel de mesoescala se insertan en el módulo de configuración. ConfigWizard establece los parámetros de simulación y las condiciones de referencia. La tabla siguiente muestra un resumen de los parámetros de configuración que permanecen constantes en las tres simulaciones:

Tabla 15 Parámetros de configuración. ENVI Wizard

Configuration model		
Time and start simulation time	July 15th, 6:00 am	
Simulation timing	24h	
Meteorology: basic settings	Wind speed: 3 m/s Wind direction: 240° Roughness: 0.01 (urban setting)	Initial atmosphere T <sup>a</sup> : default (21.85°C) Relative humidity (2m): 50% Specific humidity (2500m): default 7kg/g
Meteorology: Simple forcing	No forcing	
Vegetation and soil	Soil wettnes: Default values (0-20 cm) 50%; (20-200 cm): 60%	Plant model: Default values Transpiration model: A-gs Photosynthesis CO <sub>2</sub> background: 350 ppm

Estos datos se vinculan al modelo geométrico \*.INX lo que permite hacer cambios bien en las geometrías o bien en las condiciones de referencia o parámetros de simulación facilitando las simulaciones paramétricas. El archivo \*.SIM generado es el archivo de simulación.

## 9.6 ANÁLISIS ITERATIVO

Partiendo del análisis inicial del modelo de referencia y las variantes, se desarrollan diferentes iteraciones para evaluar el impacto de los cambios aislados en cada uno de los parámetros más relevantes sobre el microclima, radiación, viento y elementos vegetales.

En el análisis se excluyen las fuentes de calor antropogénicas y los cerramientos de los edificios se consideran adiabáticos para evitar el efecto del intercambio energético a través de los cerramientos. La siguiente tabla muestra las iteraciones realizadas y a nivel cualitativo, el efecto sobre la temperatura y humedad.

ID	Viento	Soleamiento	Altura edificación	LAD cubierta
1	3 m/s	x	15m	0.3 m2/m2
2	0.5 m/s	x	15m	0.3 m2/m2
3	2m/s	x	15m	0.3 m2/m2
4	1m/s	x	15m	0.3 m2/m2
5	1m/s	√	15 m	0.3 m2/m2
6	1m/s	x	15 m	1.5 m2/m2
7	1m/s	x	15 m	2.2 m2/m2
8	1m/s	x	5 m	2.2m2/m2
9	1m/s	√	15 m	1.5 m2/m2
10	1m/s	√	15 m	2.2 m2/m2
11	1m/2	√	15 m	1.5 m2/m2 + trees

Ilustración 2 Matriz de simulaciones

La secuencia de iteraciones parte del viento como parámetro variable inicial, que según los datos medios a nivel de mesoclima obtenidos del de la base de datos de Energy Plus<sup>16</sup>, el rango de velocidad de los vientos en verano comprende entre 0 y 3 m/s, manteniendo una dirección principal del Sudoeste. En base a esta condición, se modelan los diferentes escenarios bajo las distintas condiciones de viento, centrándose este primer grupo de simulaciones en áreas no expuestas directamente a la radiación solar para minimizar la influencia de la radiación de onda larga sobre la temperatura y humedad del aire en la zona habitable del cañón (entendida como el volumen comprendido entre 0 y 2,5 m. sobre el suelo).

A partir de estos primeros resultados, se pasa a variar la exposición solar y por último la densidad de vegetación en la cubierta. La siguiente tabla presenta el flujo de simulaciones:

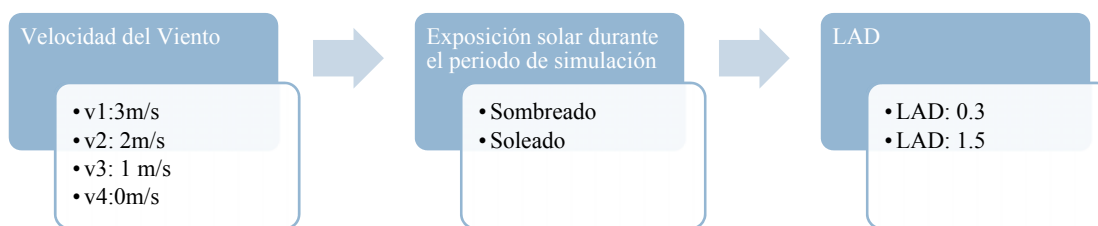


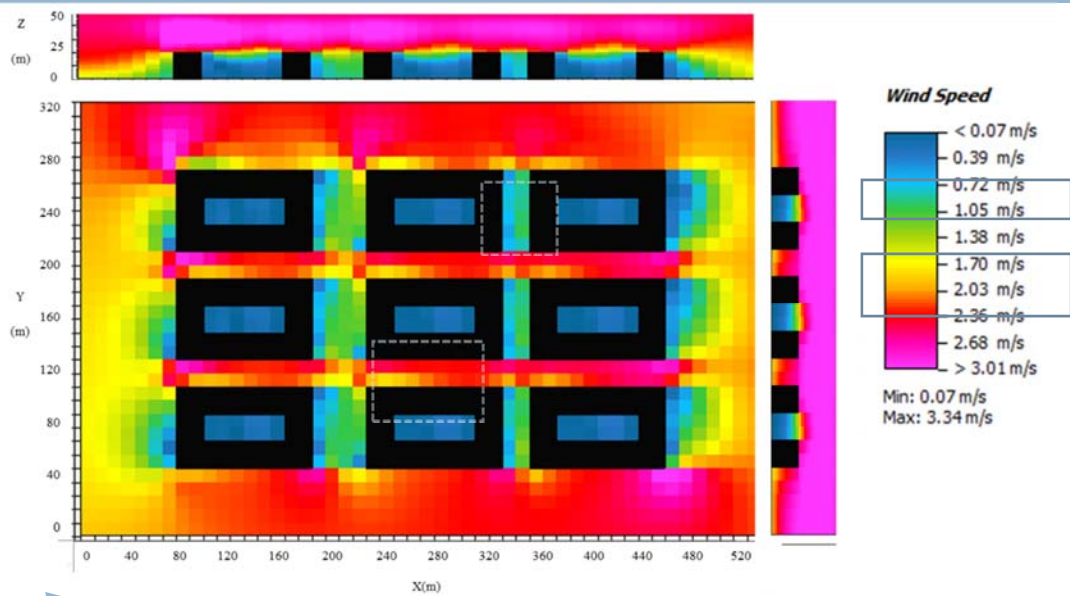
Ilustración 3 Flujo de iteraciones

## 9.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para evaluar el impacto de las cubiertas ajardinadas bajo diferentes velocidades del viento, el primer análisis ha sido la evaluación de la velocidad en el cañón urbano en cada escenario de viento. La siguiente tabla muestra la velocidad del viento a nivel de calle medida a 1,4 m de altura en la trama urbana para las diferentes velocidades de viento a nivel de “urban canopy” analizados ( $u_{uc}$ ) 3, 2, 1 y 0 m/s a la hora pico de calor analizada.

<sup>16</sup>—Los ficheros climáticos de Energy Plus representan datos horarios para un año típico (TMY) que se obtienen mediante el análisis de un periodo de mediciones de 30 años. Los ficheros climáticos se pueden descargar de [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata\\_about.cfm](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/weatherdata_about.cfm)

Velocidad del viento en el cañón urbano a nivel de calle (  $Z=1,4$  m).  $u_{uc}$ : 3m/s

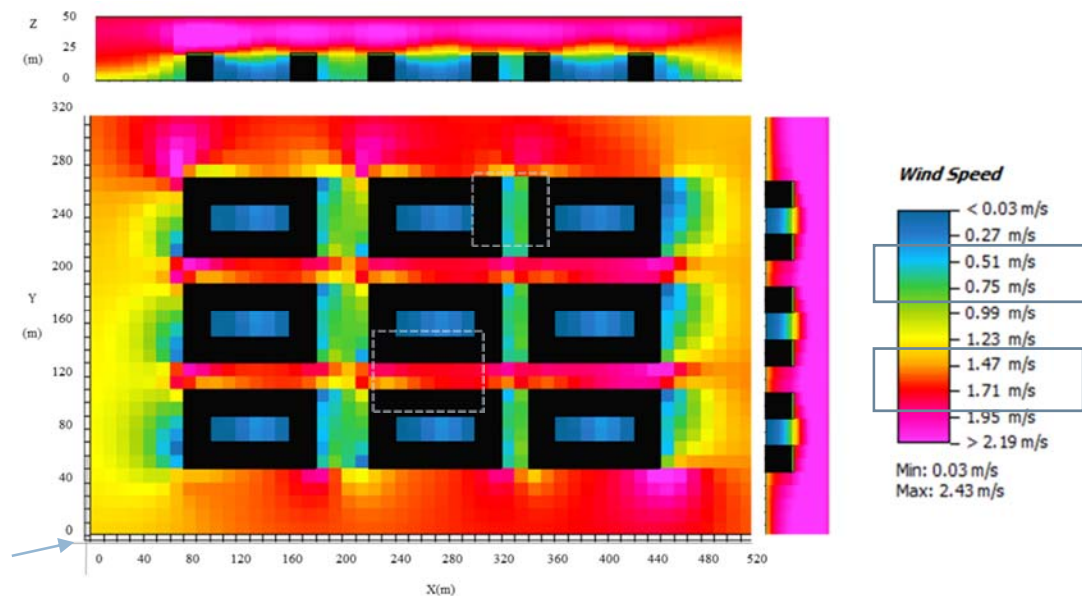


Viento de referencia 3 m/s (urban canopy) dirección sudoeste (250°)

Velocidad de viento ( $u$ ) en cañón oblicuo-transversal a la dirección de viento  
(cañón N-S):  $u < 1$  m/s

Velocidad de viento ( $u$ ) en cañón oblicuo-longitudinal a la dirección de viento  
(cañón E-O):  $2 \text{ m/s} > u > 1 \text{ m/s}$

Velocidad del viento en el cañón urbano a nivel de calle (  $Z=1,4$  m).  $u_{uc}$ : 2 m/s

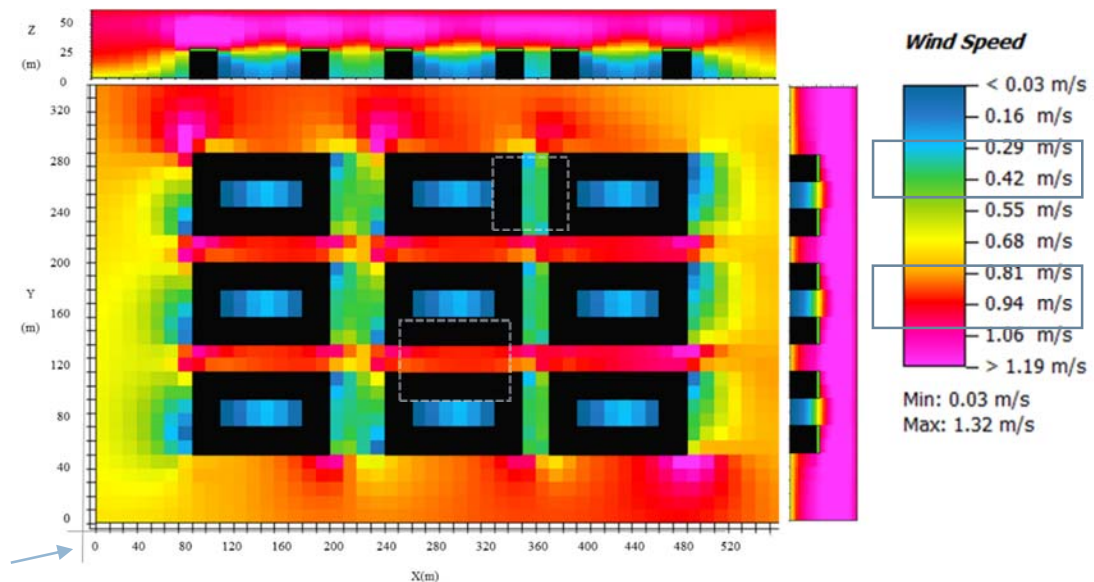


Viento de referencia 2 m/s (urban canopy) dirección sudoeste (250°)

Velocidad de viento ( $u$ ) en cañón oblicuo-transversal a la dirección de viento  
(cañón N-S):  $u < 1$  m/s

Velocidad de viento ( $u$ ) en cañón oblicuo-longitudinal a la dirección de viento  
(cañón E-O):  $2 \text{ m/s} > u > 1 \text{ m/s}$

**Velocidad del viento en el cañón urbano a nivel de calle (  $Z=1,4$  m).  $u_{uc}$ : 1 m/s**



Viento de referencia 13 m/s (urban canopy) dirección sudoeste (250°)

Velocidad de viento ( $u$ ) en cañón oblicuo-transversal a la dirección de viento  
(cañón N-S):  $u < 0,5$  m/s

Velocidad de viento ( $u$ ) en cañón oblicuo-longitudinal a la dirección de viento  
(cañón E-O):  $1 \text{ m/s} > u > 0,5$  m/s

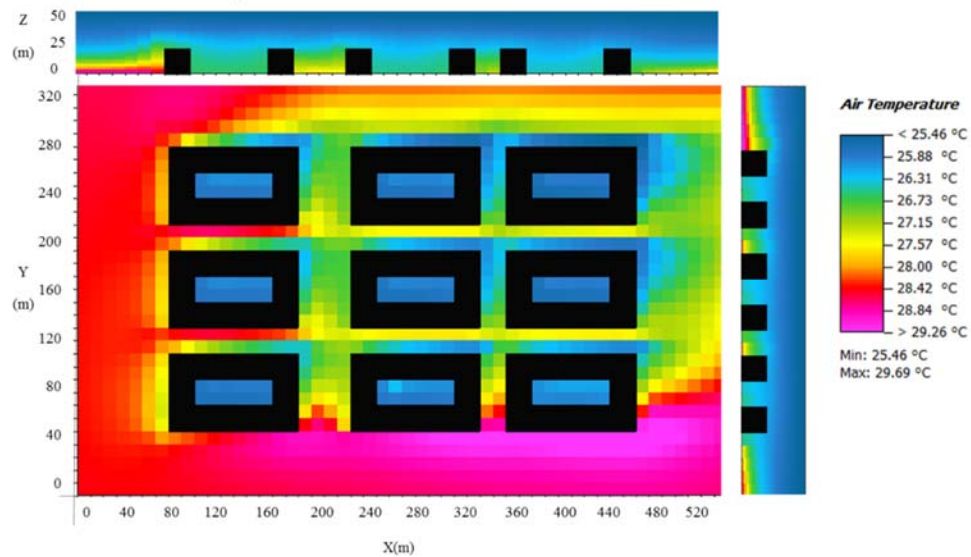
En el interior del cañón transversal a la dirección del viento, la velocidad desciende notablemente en toda la altura del cañón. Para los tres escenarios de velocidad, la velocidad oscila entre 0,5 y 0,75 m/s, mientras que en el cañón E-O, la velocidad del viento se mantiene más cercana a la velocidad de referencia, entre 2,5 y 1 m/s, lo que se ajusta a los resultados obtenidos por Georgakis y Santamouris para cañones de similares características en cuanto a las reducciones de viento en el interior de los cañones urbanos (Georgakis & Santamouris, 2005).



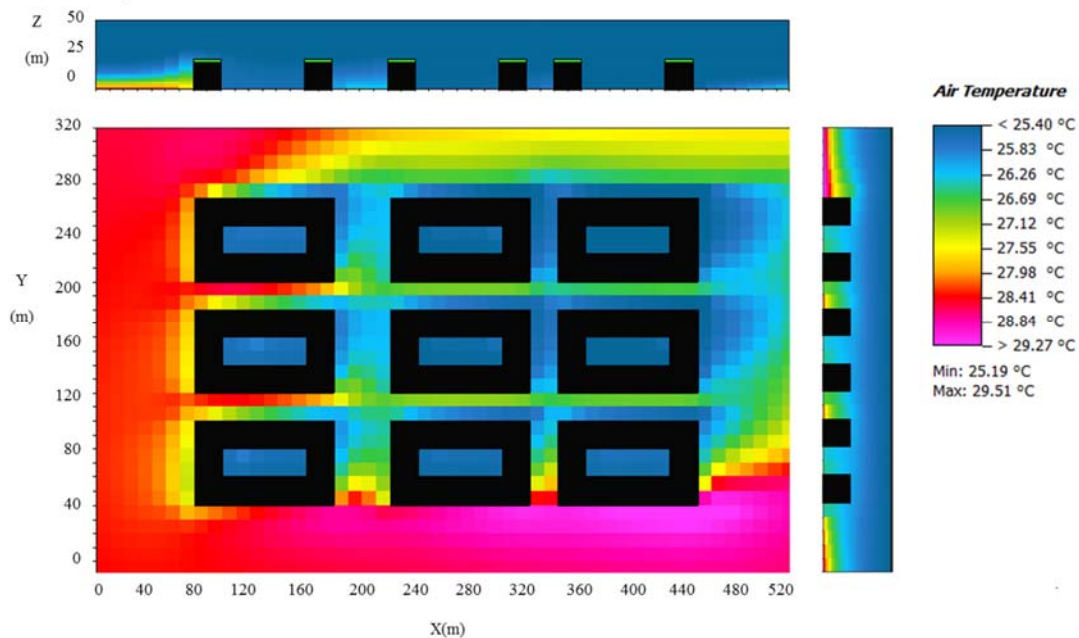
El análisis de temperatura y humedad se ha realizado a una velocidad de viento a nivel de “urban canopy” de 3 m/s. Las figuras a continuación muestran los resultados a la hora pico de calor del día 15:00h.

#### ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD. $u_{uc}$ : 3m/s

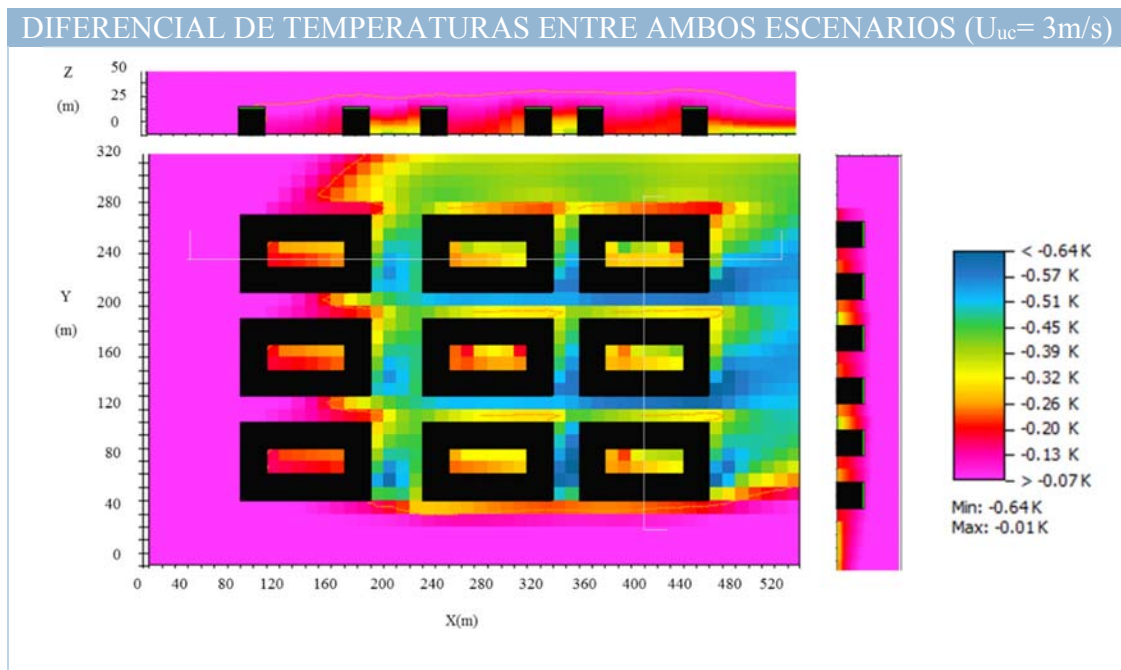
##### Cubierta de hormigón



##### Cubierta ajardinada, LAD: 0,3



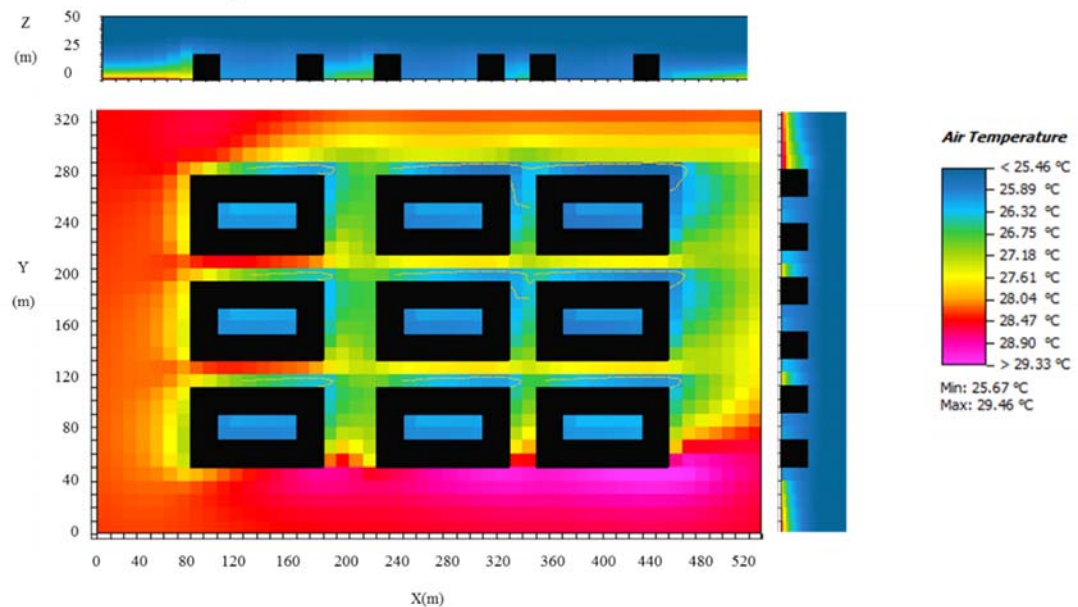
Los resultados en estas condiciones, muestran una variación de temperatura  $\Delta T$  (K) comprendida entre 0,4 y 0,64 K en el periodo de simulación. La humedad relativa permanece invariable entre ambos escenarios, constante a 50%. La siguiente figura muestra la variación de temperatura entre ambos escenarios. La siguiente figura muestra el diferencial de temperaturas entre el escenario de cubierta de baldosa de hormigón y la que incorpora la cubierta ajardinada con LAD 0,3.



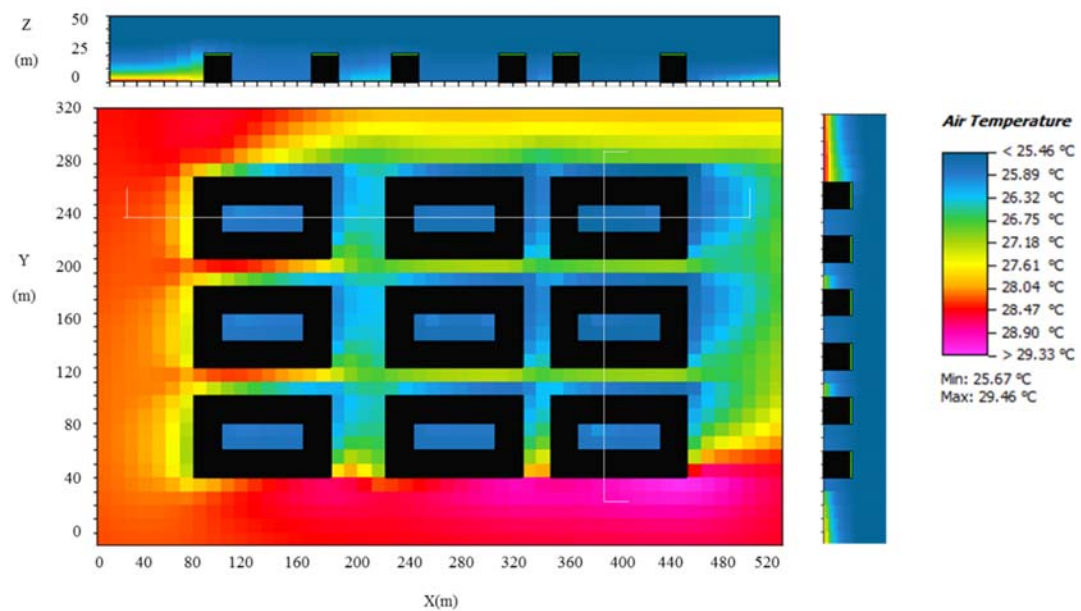
El mismo análisis se ha realizado para las diferentes velocidades de viento prevalentes en verano en Madrid a 2, 1 y 0 m/s.

## ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD. Velocidad del viento 2 m/s

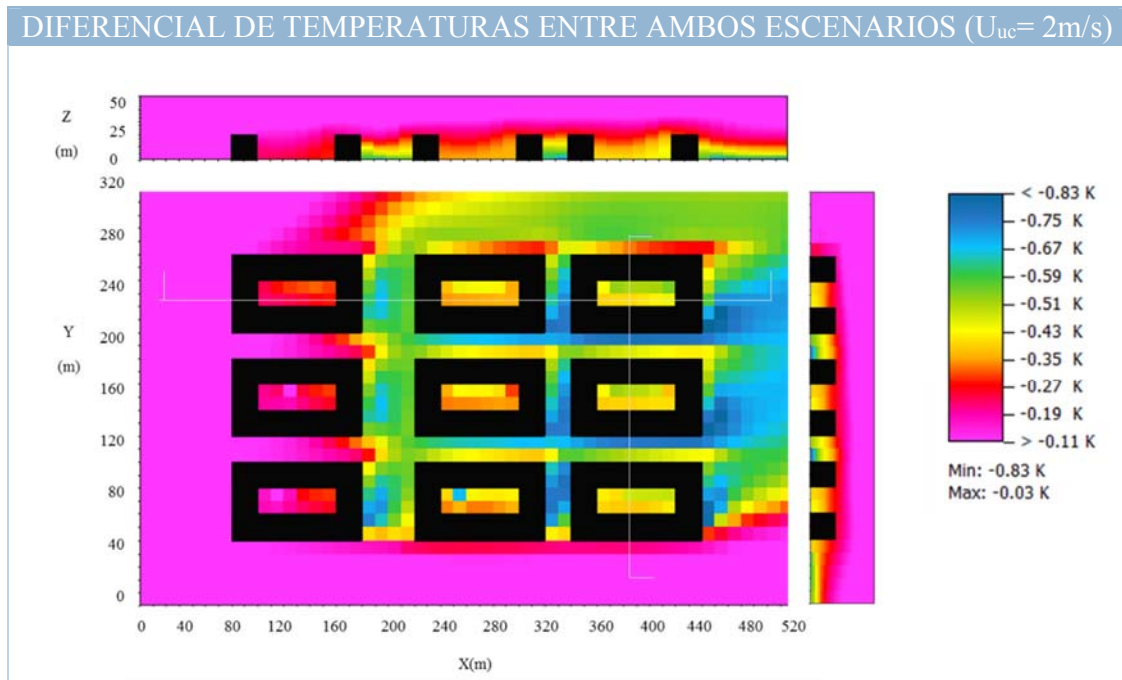
### Cubierta de hormigón



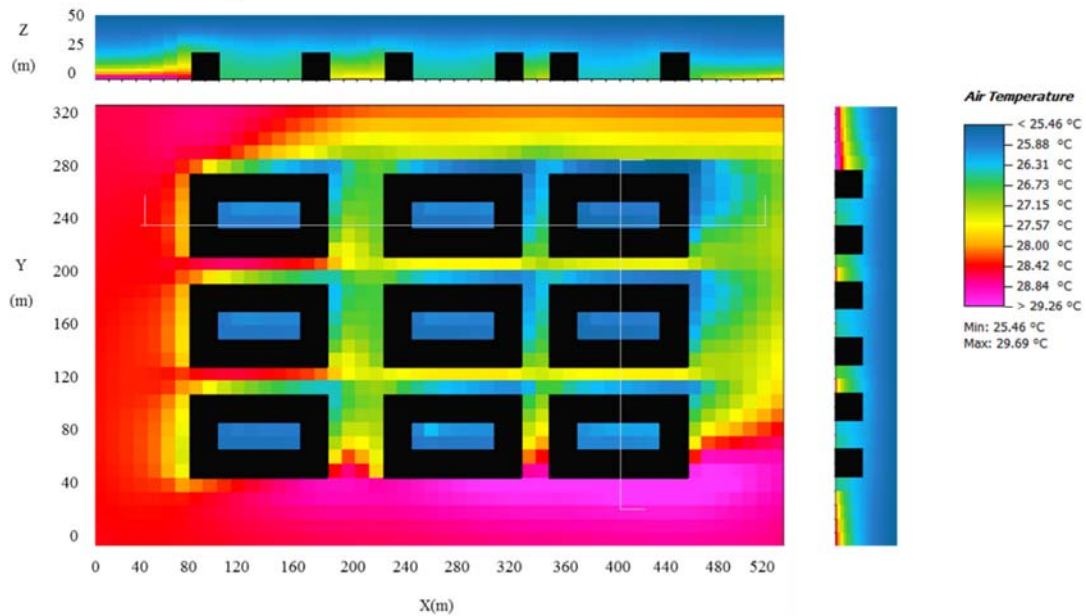
### Cubierta ajardinada, LAD: 0,3



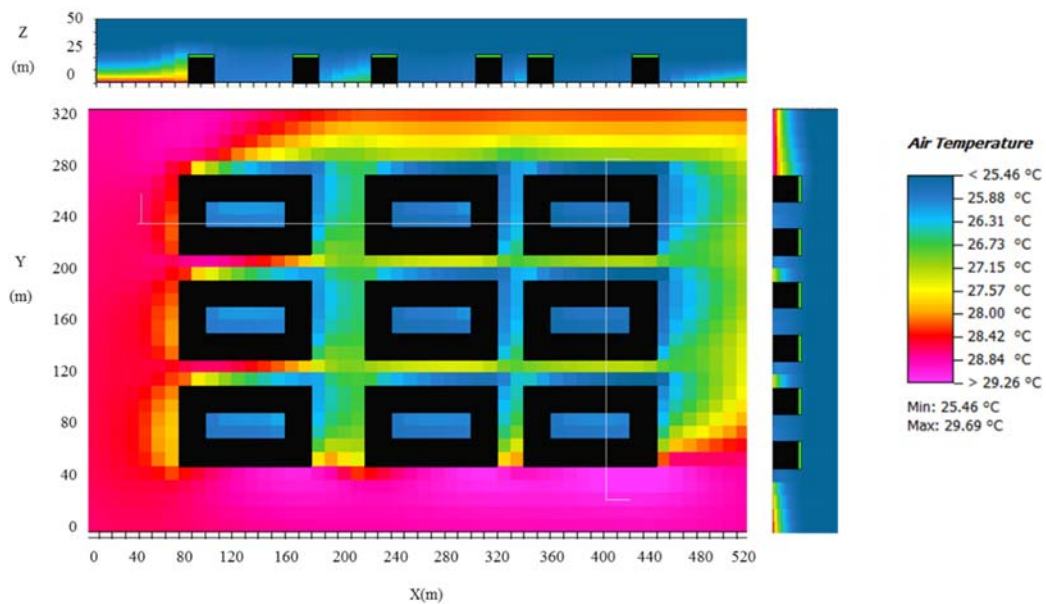
Para el escenario de velocidad de viento a 2 m/s, los resultados son similares al caso anterior, mostrando un  $\Delta T$  (K) comprendido entre 0,4 y 0,83 K en el periodo de simulación, con cambios inapreciables en la humedad relativa a nivel de calle.



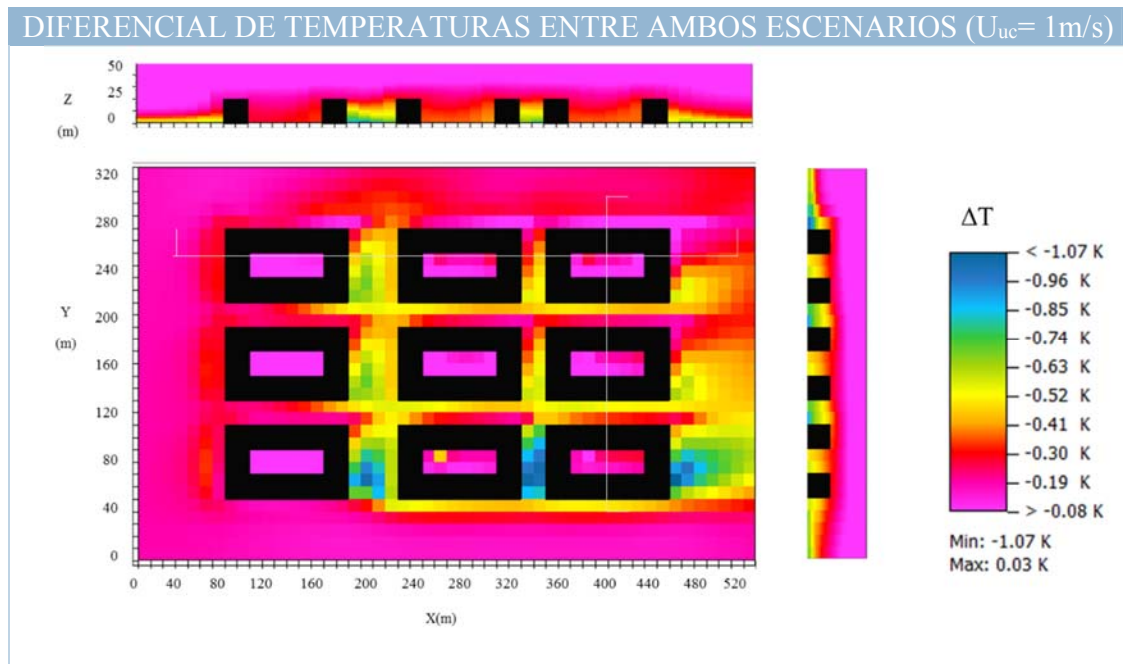
Cubierta de hormigón



Cubierta ajardinada, LAD: 0,3







En los tres casos analizados, la diferencia de temperatura a nivel de calle ( $z=1.4\text{m}$ ) entre el escenario de cubierta de hormigón y la ajardinada está comprendida entre 0,4 y 1 K (menores en los cañones con confinados por edificios con cubiertas ajardinadas). Se aprecia la influencia de la velocidad del viento, que a velocidad mayor, mayor mitigación del efecto refrigerante de la cubierta. En cualquier caso, las diferencias son mínimas entre los diferentes escenarios de viento, lo que puede deberse a que estas diferencias a nivel mesoescala, se traducen en rangos de diferencias de velocidad del viento dentro de los cañones urbanos mucho más reducidas, resultando en escenarios muy similares entre sí.

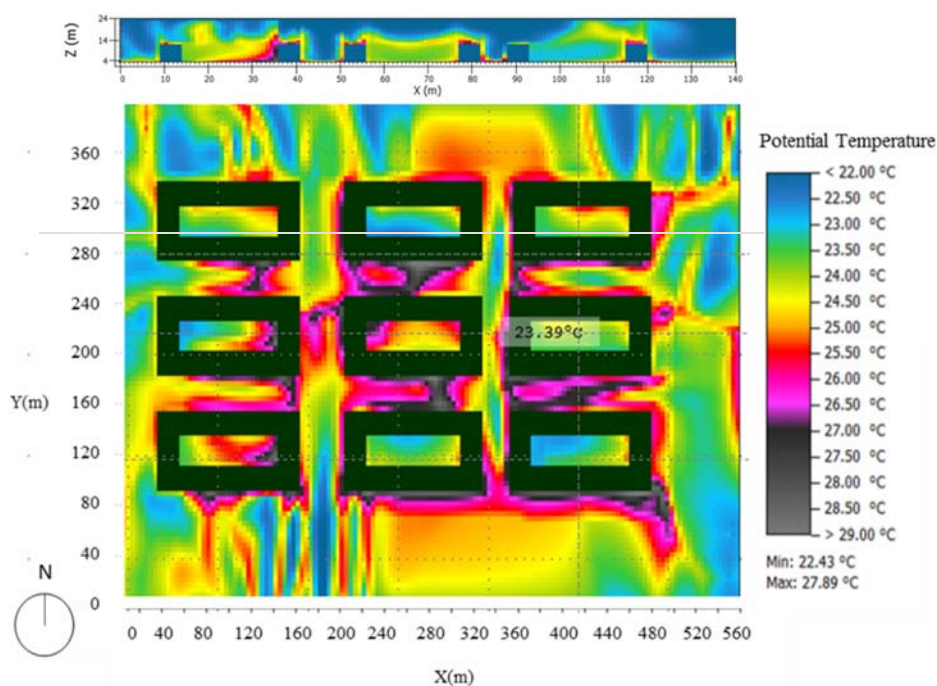
Una de las diferencias observadas es que en el escenario con una velocidad de viento menor, se aprecia más la reducción de temperaturas en el volumen habitable del cañón. Esto puede originarse por el menor movimiento de aire dentro del cañón en los casos de velocidad del viento de referencia baja, que favorece el descenso del aire más frío hacia las capas inferiores del cañón.

La humedad relativa ha permanecido con variaciones mínimas en los diferentes escenarios analizados comprendidas entre 0% y 1%.

El análisis de la velocidad con viento a 0 m/s no se pudo completar con la herramienta ENVI-met. El modelo de turbulencia de la herramienta no permite la finalización de la simulación sin viento y da errores que no permiten extraer resultados. Ante esta limitación, se realiza la simulación a 0,5 m/s y los resultados muestran turbulencias que no permiten extraer resultados que reflejen un efecto específico en los diferentes tipos de cañón analizados.

#### ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD. $U_{uc}= 0,5\text{m/s}$ , $Z=1,4\text{m}$

##### Cubierta de hormigón



La limitación del software ENVI-met para simular a velocidades de viento bajas se incluye en la descripción del software, que hace referencia a la necesidad de cambiar el modelo de turbulencia para este tipo de condiciones (Bruse, ENVI-met, 2015). Este tipo de cambios requieren cambios

en la estructura de la simulación que no son accesibles para los usuarios, sólo para la versión experta que tiene un acceso limitado a los desarrolladores y no está disponible públicamente.

Ante esta limitación, a efectos de cuantificar el impacto de la cubierta ajardinada sobre el microclima del cañón, se limitan los escenarios analizados entre 3 a 1 m/s, que son los que muestran resultados estables.

Dadas las diferencias tan reducidas encontradas entre los escenarios de análisis para las diferentes velocidades de viento, la cuestión que se plantea es la capacidad de ENVI-met para capturar el efecto de la cubierta ajardinada en las capas de aire inmediatamente superior a la cubierta.

Para la realización de esta simulación se reduce el tamaño de malla al mínimo permitido por el programa, 0,5 m, para evaluar las capas de aire más cercana a la superficie ajardinada en las condiciones climáticas más favorables para capturar este efecto, que según las simulaciones previas serían con una velocidad de viento de 1 m/s.

El sistema físico simulado es un elemento aislado de la trama urbana, un edificio. Para evaluar la capacidad de la herramienta para captar el efecto de la vegetación se incluye en el modelo una masa arbórea como elemento de referencia. La figura a continuación muestra los elementos físicos del sistema analizados y el modelo de configuración de la simulación con los datos climáticos.



<b>Configuration model</b>		
<b>Time and start simulation time</b>	July 15th, 6:00 am	
<b>Simulation timing</b>	24h	
<b>Meteorology: basic settings</b>	Wind speed: 3 m/s Wind direction: 240° Roughness: 0.01 (urban setting)	Initial atmosphere T <sup>a</sup> : default (21.85°C) Relative humidity (2m): 50% Specific humidity (2500m): default 7kg/g
<b>Meteorology: Simple forcing</b>	No forcing	
<b>Vegetation and soil</b>	Soil wettnes: Default values (0-20 cm) 50%; (20-200 cm): 60%	Plant model: Default values Transpiration model: A-gs Photosynthesis CO <sub>2</sub> background: 350 ppm

Los resultados de estos análisis se presentan en la figura siguiente:

### Comparativa de superficies de cubierta: hormigón, sedum, luzerne/ bosque urbano.

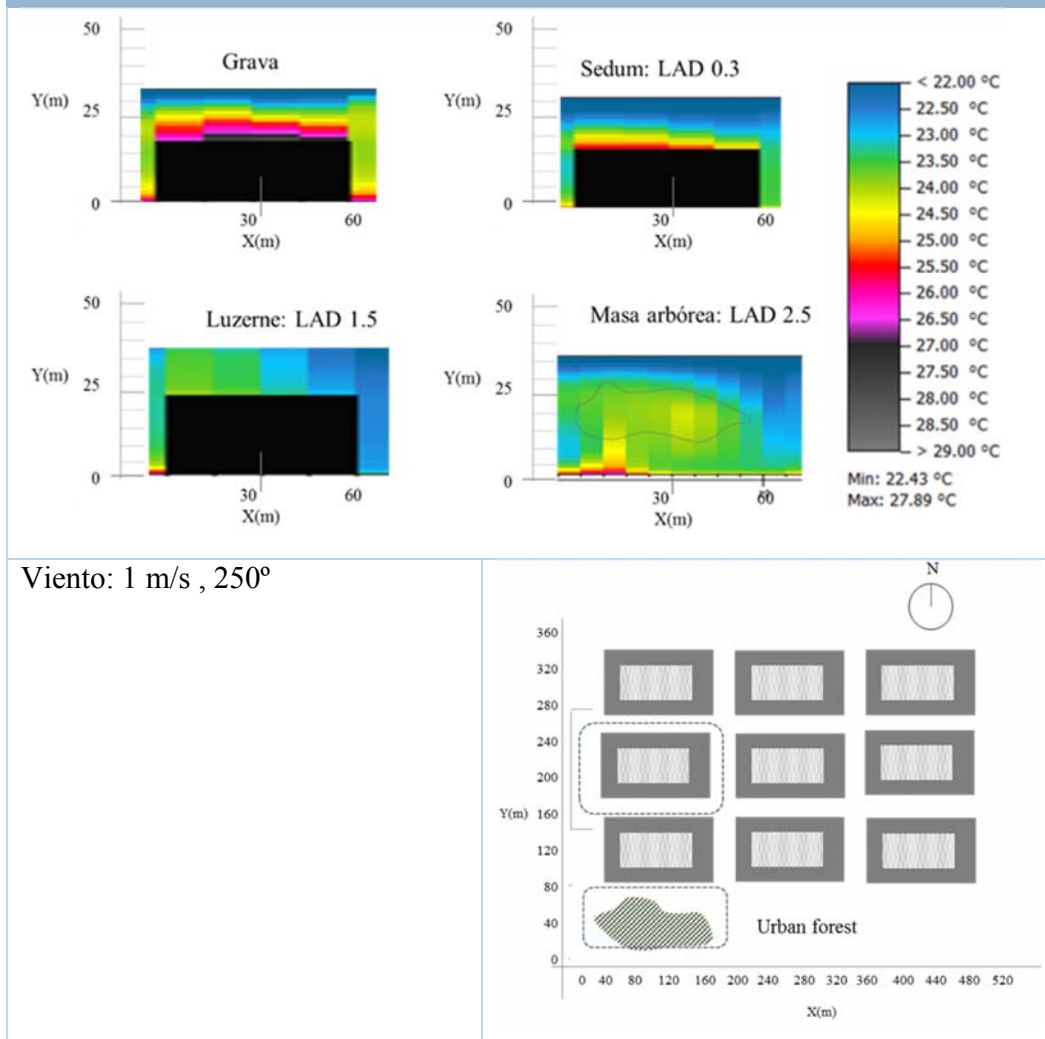


Ilustración 4 Temperatura del aire sobre la cubierta y en la masa arbórea

Este análisis muestra la temperatura en las capas inmediatamente superiores a la cubierta en los diferentes escenarios. Los resultados muestran diferencias de más de 5°C a 50 cm sobre la superficie de cubierta entre los diferentes escenarios de cubierta, por lo que se puede concluir que ENVI-met sí captura el efecto de la vegetación en su cálculo de acuerdo con lo que otros autores han confirmado, (Yang, Zhao, Bruse, & Meng, 2013) (Peng & Jim, 2013).

## 9.8 CONCLUSIONES PARCIALES

De esta fase de estudio teórico, se han extraído dos tipos de conclusiones, las primeras, sobre la herramienta ENVI-met y las segundas sobre el modelo y el objeto de estudio.

### 9.8.1 HERRAMIENTA

ENVI-met 4, es una herramienta validada y de amplio uso en el área de simulaciones de microclimas urbanos que incluyen vegetación, no obstante, en la realización de éste análisis se han observado las siguientes limitaciones:

1. El tamaño de malla: para hacer una evaluación fina del microclima en la evaluación del microclima. El tamaño máximo de malla es de 250x250x30 y las dimensiones del modelo a reproducir tiene que ajustarse en función del tamaño de celda (mínimo 0,5m). para un análisis fino, con una resolución de 0,5 m, el tamaño máximo del modelo es de 125 de lado con 15 m de altura.
2. Tiempos de cálculo: Para un cálculo fino, con una resolución alta, los tiempos de simulación son muy altos, menos de 1 s simulación por cada 4 segundos reales, lo que dificulta la realización de análisis iterativos.
3. Modelo de turbulencias: El modelo de turbulencias que usa por defecto ENVI-met 4 es el E- $\epsilon$ , sin embargo, este modelo da fallos para velocidades del viento bajas, como se ha comprobado en el estudio. Para estos casos, se debería usar el modelo de primer orden k- $\omega$ , pero esta opción no está disponible en la versión libre de ENVI-met. Investigaciones posteriores deberían evaluar el impacto microclimático de la cubierta a velocidades bajas (<1m/s) cambiando el modelo de turbulencia.
4. Datos de entrada: Los datos de entrada para simulación, están limitados a los existentes a la biblioteca. Aun existiendo la posibilidad de insertar elementos en la base de datos, para una creación de entradas correcta hace falta un nivel de detalle muy alto, dificultando el proceso para análisis con carácter general. Como ejemplo, la definición de nuevas especies

vegetales, requiere la definición del LAD por estratos ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ), lo que requiere una medición real de la especie a insertar en cada estrato de la planta.

---

### 9.8.2 MODELO

Los resultados del modelo teórico con una cubierta extensiva con LAD 0,3 (con baja densidad de hoja), muestran una baja influencia de la cubierta ajardinada en la temperatura ambiente y la humedad relativa a una altura  $Z=1,4$ .

La inclusión de cubiertas ajardinadas reduce la temperatura del aire en el volumen habitable del cañón urbano, mientras que la humedad permanece con mínimas variaciones. La influencia del viento se ve reducida en por el descenso de velocidad que se produce dentro del cañón. Aun así, en los escenarios con velocidades mayores, el efecto de la cubierta ajardinada sobre la temperatura ambiente se reduce, con reducciones máximas en torno a  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que con velocidades menores el efecto se hace más notable llegando a  $1^{\circ}\text{C}$ .

El efecto de la cubierta ajardinada se evidencia con vegetaciones en la cubierta más densas, o en masas arbóreas en el área peatonal.

## 10. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Una vez identificados los patrones de comportamiento para las diferentes condiciones de viento, se realiza una simulación de un caso de estudio real con cubierta ajardinada que se coteja con mediciones reales.

Los parámetros de estudio, al igual que en el estudio teórico son la temperatura y la humedad relativa, teniendo en cuenta los patrones de velocidad y dirección de viento en el entorno de estudio. El objeto de este estudio experimental no es la validación del modelo, si no la comprobación de tendencias. El siguiente esquema presenta la secuencia de análisis realizados en ésta fase de la investigación:

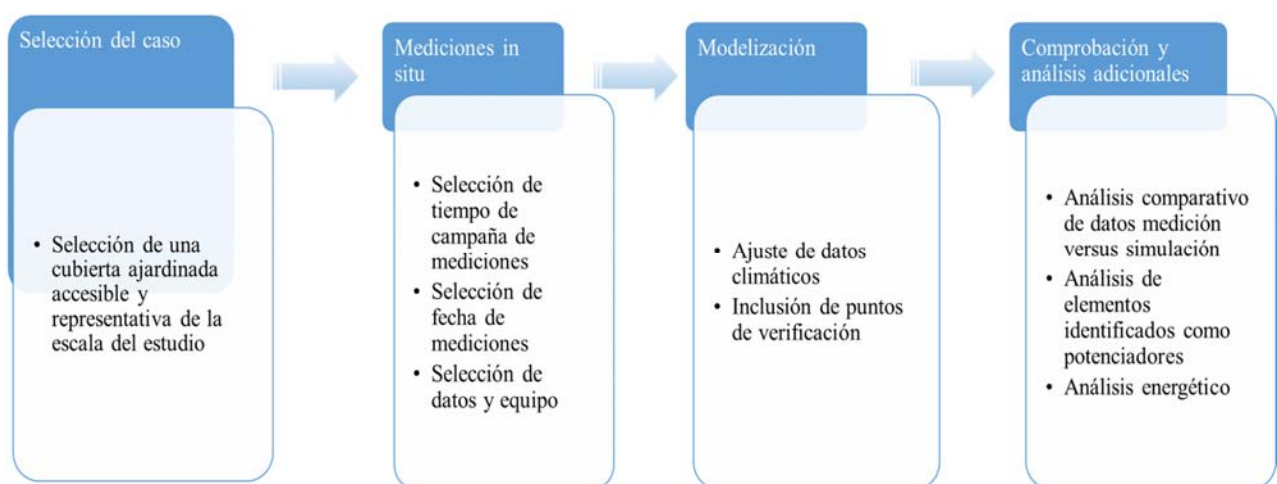


Figura 34 Proceso del estudio experimental

Los criterios para la selección del entorno de estudio han sido principalmente la integración de cubierta ajardinada, la escala y la configuración urbana. Para la realización de este estudio ha sido necesaria la identificación de un entorno urbano que integrase un área de cubierta ajardinada representativa para el análisis, que fuese accesible para realizar la campaña de mediciones y con una escala representativa para el análisis microclimático, que según la definición de la escala se comprendería entre  $10^2$  y  $10^3$  en la dimensión horizontal y 10 en la dimensión vertical. (Geiger, Aron, & Todhunter, 1927).

En base a este criterio, el ámbito seleccionado ha sido el parking de la terminal T4 del Aeropuerto Adolfo Suarez de Madrid. Un edificio destinado a aparcamiento de dimensiones 800m x 200m x 15m cuya cubierta configura la cubierta ajardinada más grande de Europa, con cerca de 12 Ha de cubierta ajardinada extensiva. El control y gestión de este edificio lo realiza AENA, que accedió a la monitorización de la cubierta y su entorno durante un periodo de un día.

El edificio se encuentra rodeado por accesos rodados al parking y a la terminal, que se configuran en una estructura de bandejas a dos alturas cubiertas pero sin cerramientos verticales que las confinen.

La siguiente figura muestra las características del edificio y su entorno, así como las plantas y secciones del entorno de estudio.

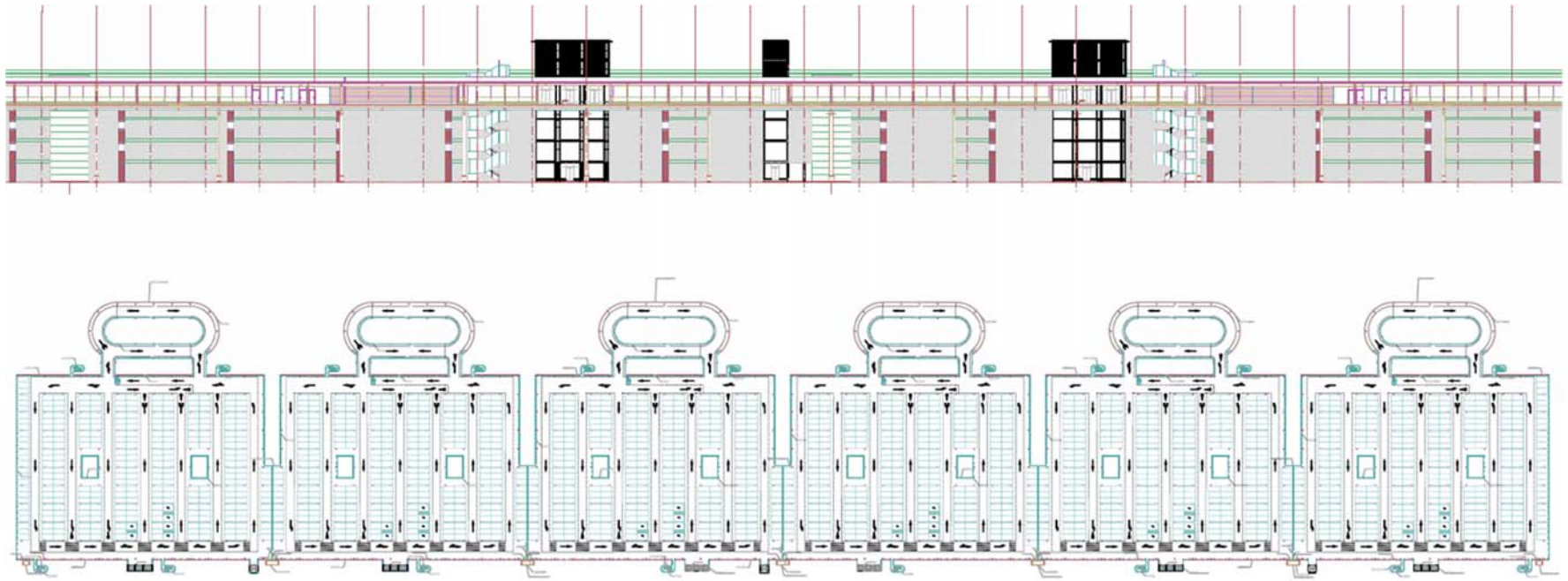


Figura 35 Planta y alzado del edificio. Parking T4 Aeropuerto



Figura 36 Imagen en planta y alzado del parking de la terminal T4 del Aeropuerto Adolfo Suarez de Madrid.

## 10.2 EXCLUSIONES Y LIMITACIONES

Una de las principales dificultades en esta parte del estudio ha sido la identificación de una cubierta ajardinada accesible y que representase la escala del entorno físico que ocupa esta investigación. En este contexto, el edificio de la T4 se ajusta a los objetivos del estudio en cuanto a la escala de la cubierta y los edificios, sin embargo, una de las limitaciones a considerar es que en sí, no es un ámbito urbano sino el entorno de un edificio de gran escala. A pesar de que dadas las dimensiones del edificio, de 800 m de longitud y 15 m de altura, entran dentro del concepto de escala de microclima, el carácter del entorno del edificio no se ajusta a la definición de un cañón urbano convencional, sino que está confinado por edificios rodeados de accesos rodados que no tienen el carácter y uso de calle, ni unos límites claros que definan el cañón.



Para representar el edificio en el modelo, se ha creado un cañón ancho, tipo avenida, con un radio de aspecto  $>0,5$  para representar el área de estudio, minimizando así el efecto de los edificios delimitantes en el microclima generado.

Los edificios que lo confinan se han modelado como no acondicionados y con los cerramientos que configuran sus límites como adiabáticos para independizar el área de análisis de cualquier transmisión energética a través de los edificios que lo confinan en el modelo.

Al igual que en el estudio teórico, no se han considerado las fuentes antropogénicas en este estudio, por no ser una fuente relevante dentro del entorno de estudio, caracterizado por una densidad muy baja de circulación en el entorno próximo del área de estudio.

### 10.3 CAMPAÑA DE MEDICIÓN

La campaña de mediciones se limitó a un día por las limitaciones impuestas por AENA al acceso al área de estudio. Este periodo se ajusta a los periodos de simulación desarrollados con ENVI-met, que como se ha explicado en el análisis de la herramienta, admite periodos de simulación limitados a 24-48 h, por lo que las limitaciones impuestas a la campaña no se han considerado críticas para el objeto de este estudio, que como se ha indicado es la captura y comparación de tendencias en la evolución horaria de temperaturas y humedad en el entorno de estudio.

Para la selección del día de mediciones, se seleccionó un día de verano, en el que las predicciones meteorológicas pronosticaran una velocidad de viento baja, con cielos despejados. El día 9 de Julio de 2014 se ajustaba a esas condiciones y se seleccionó como fecha para la realización de la campaña de mediciones. La siguiente figura muestra los registros meteorológicos en la estación meteorológica del aeropuerto de Barajas para la fecha de las mediciones.

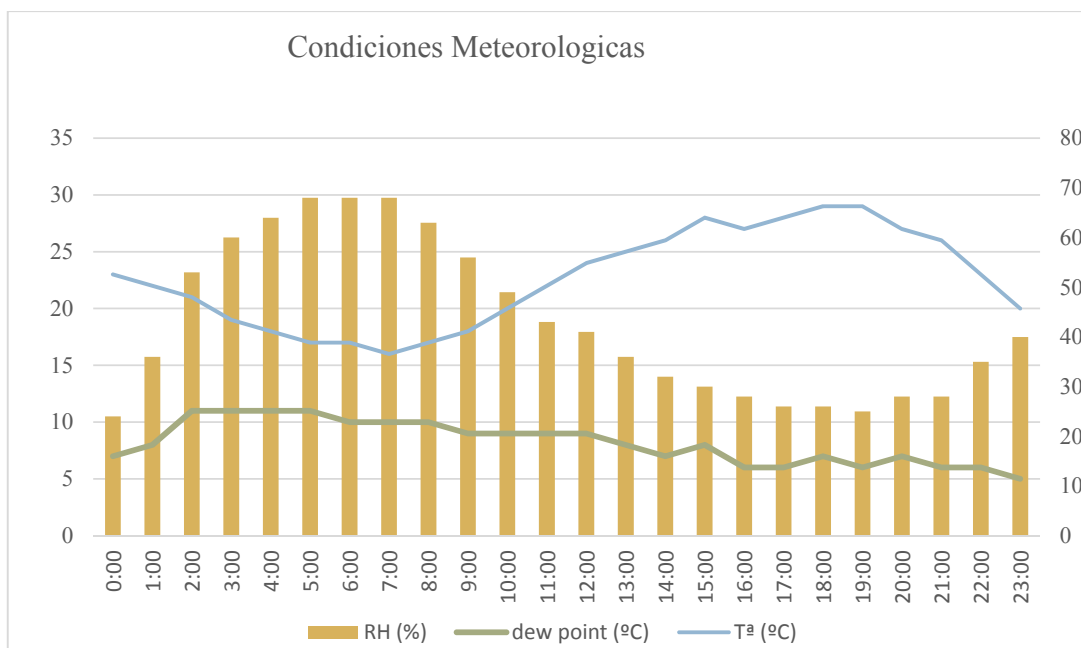


Figura 37 Registros de temperatura y humedad para la fecha de mediciones. Fuente: AEMET

Los puntos de medición se han fijado de acuerdo a la exposición solar. La siguiente figura muestra los puntos de medición:

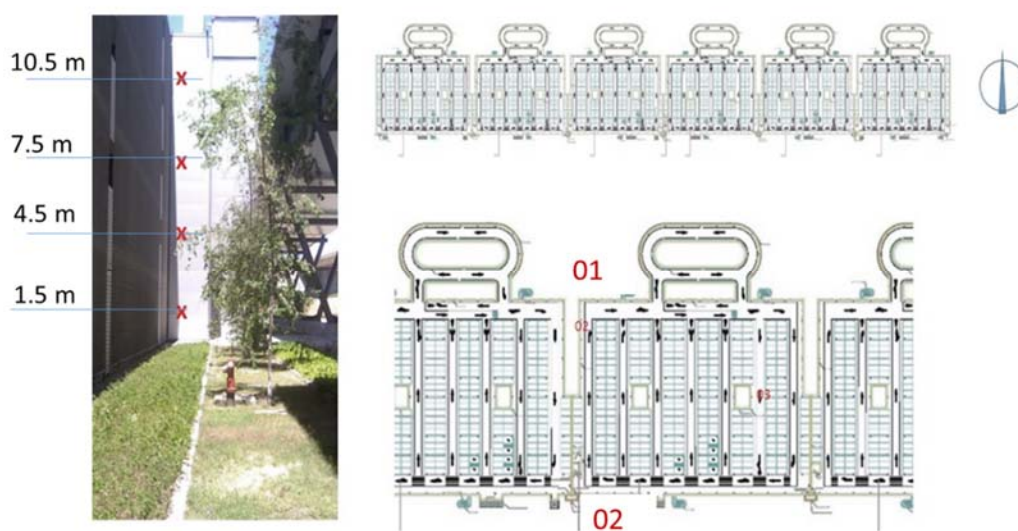


Figura 38 Puntos de medición

Se han tomado medidas horarias en el periodo permitido por AENA, entre las 9:00 y las 19:00h a 1,5- 4,5- 7,5 y 10,5 metros sobre el nivel del suelo y a 1 m de separación de la fachada. Los registros tomados han sido temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento. Así mismo, se han tomado también termografías de las superficies cercanas a los puntos de medición para evaluar los factores con influencia potencias sobre las temperaturas registradas.

Dado el carácter temporal de la campaña de mediciones y la imposibilidad de dejar equipos permanentes para los registros, los equipos usados han sido portátiles. La siguiente tabla muestra el equipo usado para las mediciones.

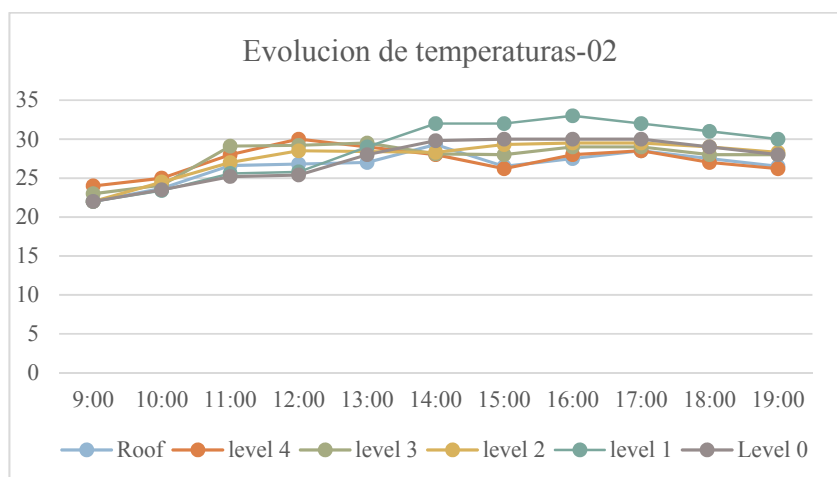
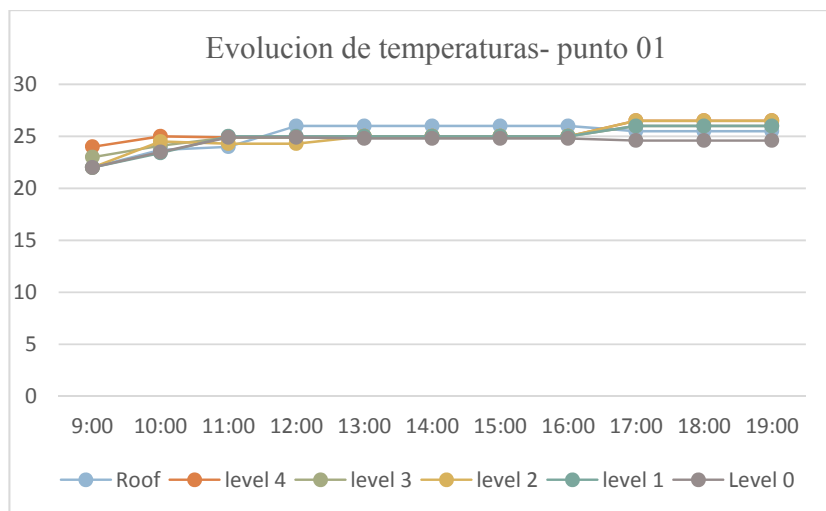
Tabla 16 Equipos de medición

Parámetro	Equipo y modelo	Características
<b>Temperatura del aire</b>	Testo 410-2 	Temperatura Resolución: 0,1 °C Rango: -10°C a 50°C Exactitud: ±0,5
<b>Humedad relativa</b>		Humedad relativa Resolución: 0,1 % Rango: 0-100% Exactitud: ±0,5
<b>Velocidad y dirección de viento</b>		Viento: Rango: 0,4 a 20 m/s Exactitud: ±0,5
<b>Temperatura de las superficies</b>	Cámara termográfica FLIR E4 	Resolution 0,15°C. Minimal distance to surface of 0,5 m Rango: -20°C and 250°C.

---

### 10.3.1 TOMA DE DATOS

Las siguientes figuras muestran las temperaturas registradas en los diferentes niveles y a las diferentes aturas de medición.



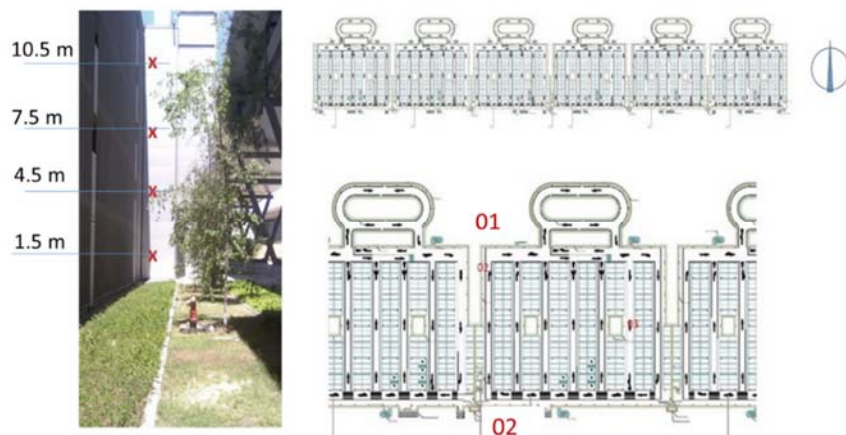


Figura 39 Registro horario de temperaturas en los puntos de medición.

Las figuras muestran la diferencia entre los registros tomados en el edificio en la fachada Sur y Norte. La fachada Norte permanece con pequeños cambios de temperatura a lo largo del día, mientras que las fachadas expuestas muestran un mayor diferencial entre los puntos con mayor exposición solar a lo largo del día. Los registros hacen evidente las variaciones entre las superficies expuestas a la radiación solar y aquellas sombreadas, así como el efecto de la cubierta ajardinada.

La humedad relativa se ha mantenido en el periodo de simulación en un rango entre 40 y 27% mientras que la velocidad del viento en el área de estudio oscila entre 1 m/s en el límite superior del ámbito de estudio, el “urban canopy” sobre la cubierta y 0,5 m/s dentro del volumen confinado por los edificios.

#### 10.4 MODELO ENVIMET

Teniendo en cuenta las principales variables identificadas en el estudio teórico, se han realizado las siguientes simulaciones para evaluar el impacto de la azotea verde en el microclima.

- a. Cubierta de losas de hormigón en edificio T4 asumiendo una grava en la azotea con albedo 0.3 . Este escenario define el Bussines As Usual ( BAU)
- b. Cubierta vegetal densa en el edificio T4 asumiendo una extensa cubierta verde con un LAD 1,5-

- c. Cubierta vegetal densa (LAD 1,5) más vegetación nivel calle. Este caso representa las condiciones actuales del edificio y se muestra en la figura 6 , que representa el diseño del edificio actual, con el techo verde y árboles distribuidos por todo el perímetro del entorno del edificio.

La figura siguiente muestra el modelo en ENVI-met

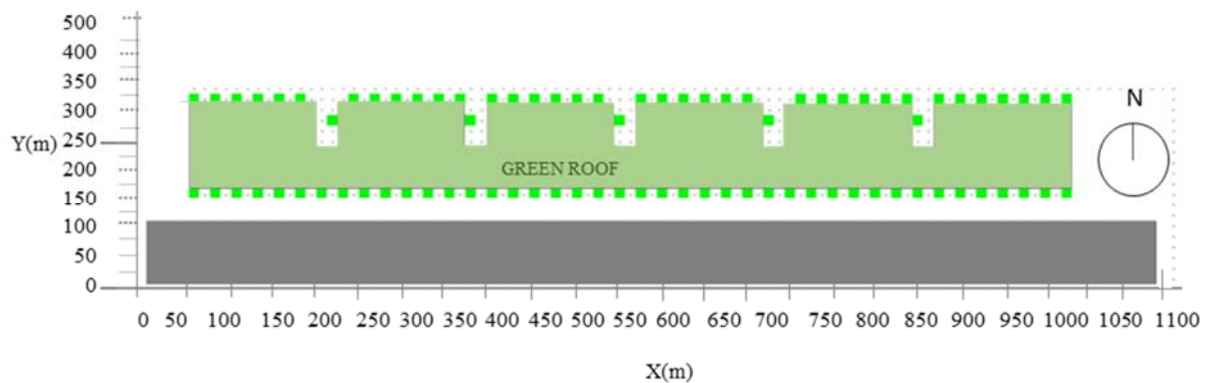


Ilustración 5 Actual building: building with high LAD green roof and surrounding trees. Scenario “d”.

Para simular el impacto de la cubierta durante el día de la campaña de medición se han obtenido datos del clima de los servicios meteorológicos de AEMET en España para el día en que se realizó la campaña de medición. Las propiedades físicas de la cubierta vegetal han sido extraídas de las bases de datos ENVI-met. Esta información comprende propiedades físicas y ópticas. Como ENVI-met V4 es un modelo predictivo de microclima, se ha forzado al programa a que en cada hora a 10 m, el modelo tome el dato de referencia proporcionado por el AEMET tanto en temperatura del aire como en humedad para mantener estas condiciones iguales que el día de la medición. La figura siguiente muestra el acoplamiento de los perfiles de temperatura ambiente de referencia en ENVI-met, reproduciendo las condiciones meteorológicas del día medido durante la duración del periodo de mediciones.

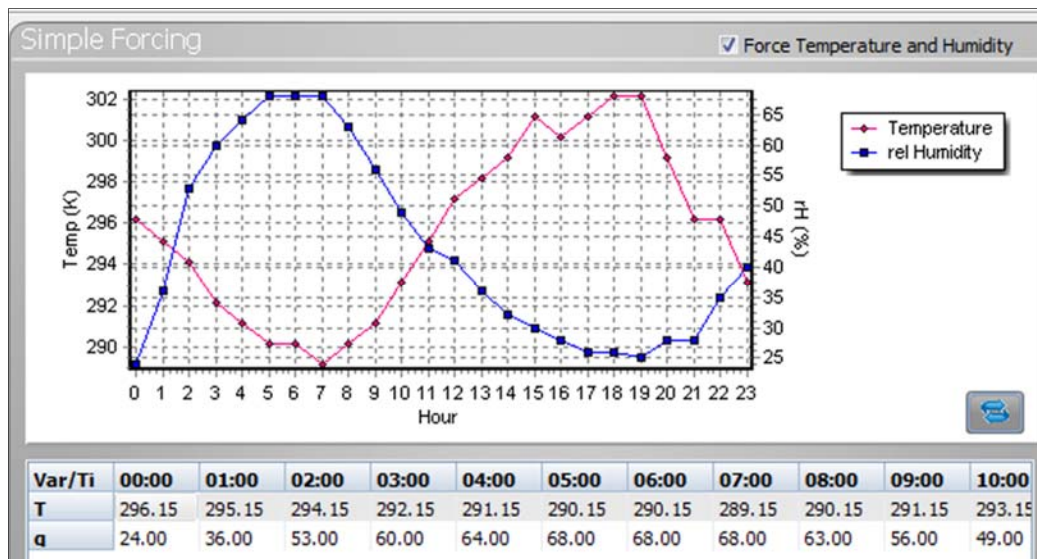


Ilustración 6 Temperature and Humidity-simple forcing reflecting real weather data for July 9th 2014.

El tiempo de simulación se ha fijado en 24 horas para permitir al modelo generar condiciones de microclima que incluyan los efectos cumulativos de las superficies radiantes. La siguiente tabla muestra los datos de configuración del archivo de simulación:

Tabla 17 Datos de configuración

Configuration model		
Time and start simulation time	July 9th, 7:00 am	
Simulation timing	24h	
Meteorology: basic settings	Wind speed: 1 m/s Wind direction: 240° Roughness: 0.01 (urban setting)	Initial atmosphere T <sup>a</sup> : default (21.85°C) Relative humidity (2m): 50% Specific humidity (2500m): default 7kg/g
Meteorology: Simple forcing	Forced to meteorological data for the simulation day	
Vegetation and soil	Soil wettnes: Default values:(0-20 cm) 50%; (20-200 cm): 60%	Plant model: Default values Transpiration model: A-gs CO <sub>2</sub> background: 350 ppm

## 10.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez hechos los cálculos del modelo con ENVI-met, se han realizado dos análisis diferentes, en primer lugar la comparación del modelo representando el caso real con las mediciones in situ, para verificar si el modelo captura la tendencia de la evolución de temperatura y humedad a lo largo del día. Una vez hecha esta verificación se ha procedido con la modelización de diferentes soluciones de cubierta y vegetación para identificar el impacto de este tipo de soluciones naturales en el microclima.

### Comparación modelo-mediciones

Los resultados para las simulaciones se han comparado para evaluar el efecto de la cubierta ajardinada con los diferentes tipos de cubierta y elementos vegetales descritos en la tabla siguiente:

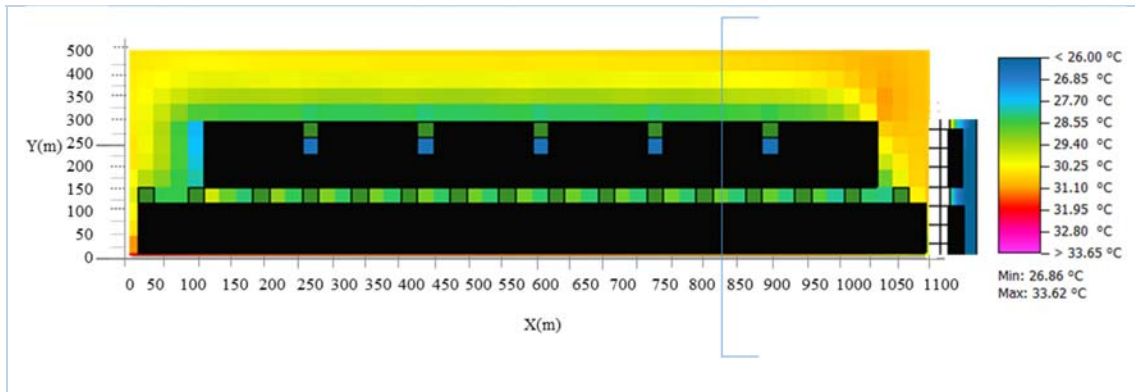
Tabla 18 Escenarios de simulación

ESCENARIOS	
A	BAU: Cubierta de baldosas de hormigón
B	Cubierta de baldosas de hormigón con vegetación a pie de calle LAD 2,2.
C	Cubierta ajardinada con luzerne LAD 1,5
D	Cubierta ajardinada con luzerne (LAD 1,5) y vegetación a nivel de suelo (LAD 2,2)-representación del caso real

El Primer análisis realizado ha sido d. que representa el caso de estudio para realizar la comparación entre las mediciones y los resultados del modelo antes de continuar con el análisis computacional de los diferentes escenarios. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

ANÁLISIS DE TEMPERATURA Y HUMEDAD. Velocidad del viento 1m/s, Z=1,4m time: 15:00
Cubierta vegetal LAD 1,5, vegetacion alrededor del edificio, LAD 2,2.





Los resultados de la simulación muestran un descenso de las temperaturas en las áreas pobladas con elementos arbóreos, registrando diferencias de hasta 4 °C entre el área dentro del cañón y las áreas soleadas perimetrales al edificio.

Estos resultados se han comparado con las mediciones reales para comprobar si ENVI-met reproduce de un modo fiable las condiciones microclimáticas en el entorno de estudio. La siguiente figura muestra la comparación entre ambos resultados.

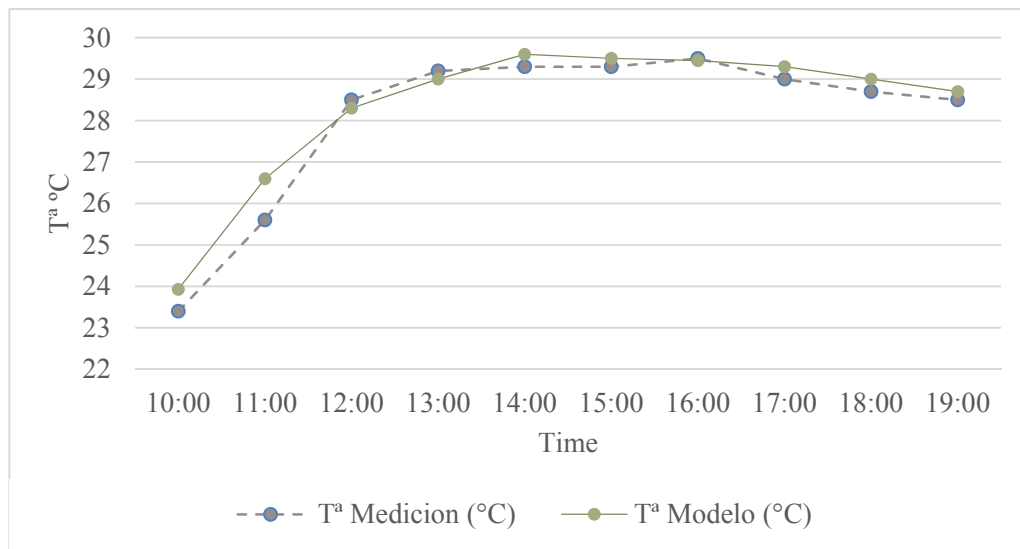


Ilustración 7 Comparativa entre temperaturas del aire medidas y resultado del modelo a 1,4 m sobre el nivel de suelo

La comparación entre las mediciones y los resultados del modelo a 1,4 m del suelo, muestran la misma tendencia en la evolución de la temperatura diurna y unos valores muy similares a lo largo del periodo de medición. Las principales diferencias se concentran en las primeras horas del día, lo que puede atribuirse al tiempo en el que el modelo está iniciando la generación de las condiciones microclimáticas y se realizan los ajustes iniciales.

Los resultados de humedad relativa permanecen en el rango entre 27% y 35%, sin variaciones significativas a lo largo del día, y similares a los valores registrados en campaña de medición, donde se mantuvieron entre 27% y un 40% durante toda la campaña.

Las principales divergencias entre los resultados del modelo y las mediciones se centran en los puntos ubicados cerca del suelo, o cerca de áreas con una exposición solar mayor durante todo el día, en los niveles altos del edificio. La siguiente imagen muestra la comparación entre las temperaturas calculadas por el modelo y las medidas en la localización 02 a lo largo de todos los puntos en altura registrados en esa localización.

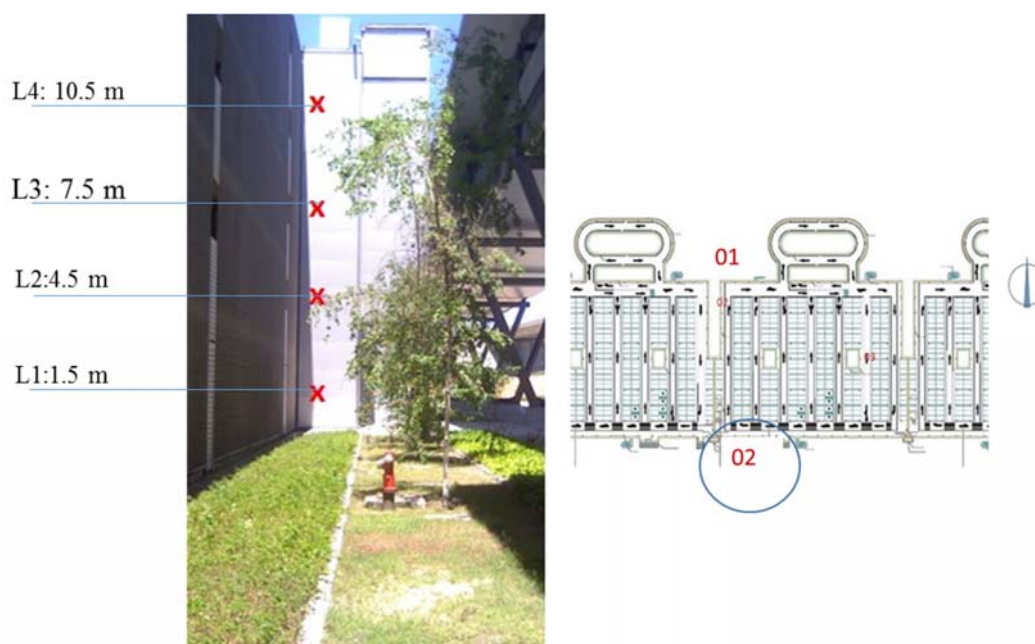


Ilustración 8: Puntos de medición

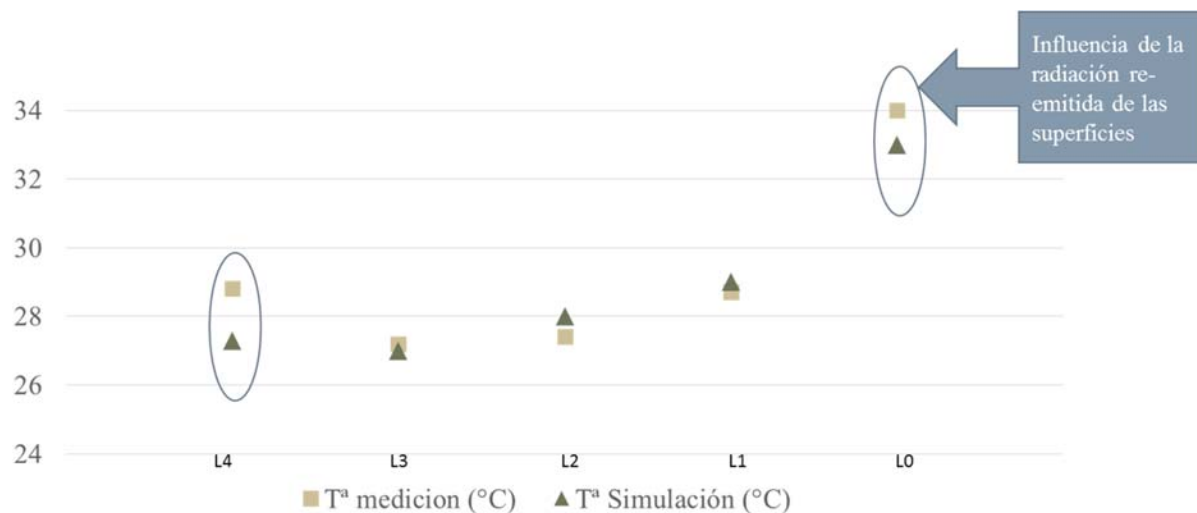


Ilustración 9 Comparación de temperaturas de simulación y medición a las 15:00 a lo largo de la altura de la fachada.

Estas divergencias se pueden atribuir a la diferencia entre las propiedades físicas de los materiales del entorno estudiado. Factores como la emisividad de los materiales y el contenido de humedad del suelo en el modelo, se basan en los datos que da por defecto ENVI-met para un determinado sistema constructivo, que pueden variar de los materiales reales. Las imágenes termográficas muestran la temperatura de los límites geométricos del entorno analizado, fachadas y diferentes tipos de suelo.

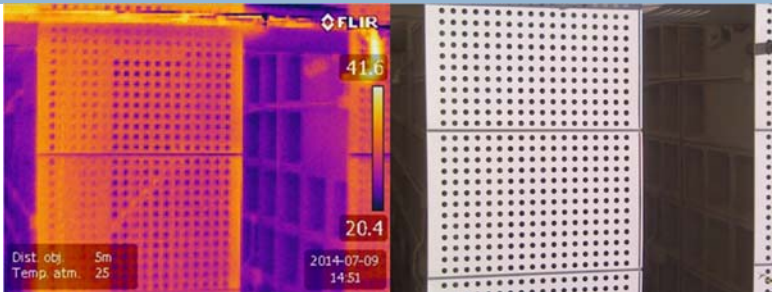
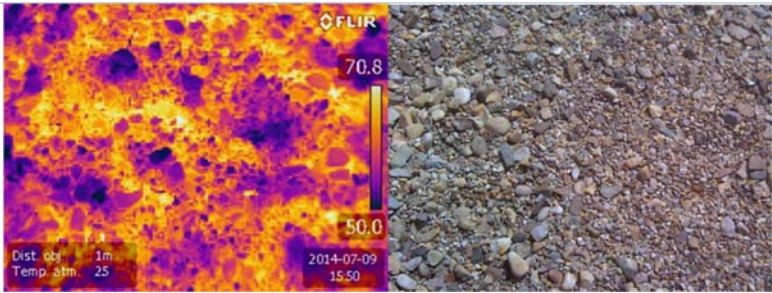
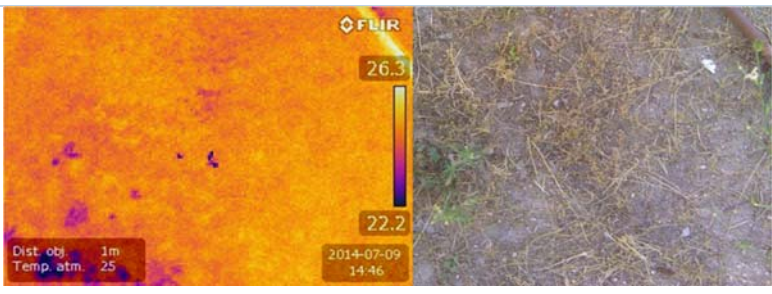
Temperatura superficial	
	<p><b>Cerramientos del edificio:</b></p> <p>Temperatura superficial de los paneles de cerramiento con exposición Sur.</p>
	<p><b>Suelo de grava:</b></p> <p>Temperatura superficial de los suelos de grava perimetrales al edificio.</p>
<b>Cubierta vegetal</b>	
	<p><b>Suelo de tierra:</b></p> <p>Temperatura superficial de los parterres irrigados.</p>

Ilustración 10 Imágenes termográficas de las superficies limítrofes del entorno de estudio. Temperatura superficial registrada a las 15:00h

Las imágenes termográficas revelan la gran influencia del tipo de material en la temperatura superficial de los límites del entorno de estudio. Como se puede observar, con una temperatura ambiente de 25°C, la fachada de metal blanco expuesta al sol registra una temperatura de 41°C, el suelo de grava gris, llega a temperaturas de 70°C, mientras que el suelo saturado húmedo de los parterres que rodean el edificio se mantiene en un rango de 22-26°C, cercano a la temperatura ambiente. Este efecto se deben principalmente al efecto de la humedad y de la reflectividad y emisividad de los materiales que conforman el estudio, cuyas propiedades no se han modelado específicamente en el modelo. Esta dificultad para modelizar exactamente las propiedades de

los materiales, se considera la justificación de las divergencias de temperatura observadas en las áreas influenciadas por las superficies delimitantes del entorno de estudio.

#### Modelización de soluciones vegetales

Una vez que se han comprobado las tendencias y verificado que el software representa con un grado de aproximación alto los valores y tendencias obtenidas en la campaña se han simulado los diferentes escenarios variando el tipo de cubierta ajardinada para evaluar su impacto sobre el entorno se acuerdo a la definición de los escenarios mostrada en la tabla 12. La primera simulación, a. representa el edificio con una cubierta de baldosas de hormigón gris. Su albedo es 0.3. Estos datos se han extraído de la base de datos de ENVI-met. Así mismo, se ha realizado una segunda simulación incluyendo los árboles a nivel de suelo, para poder evaluar el efecto individual de cada estrategia vegetal, simulación b Las siguientes figuras muestran los resultados de éstas simulaciones con cubierta de hormigón:

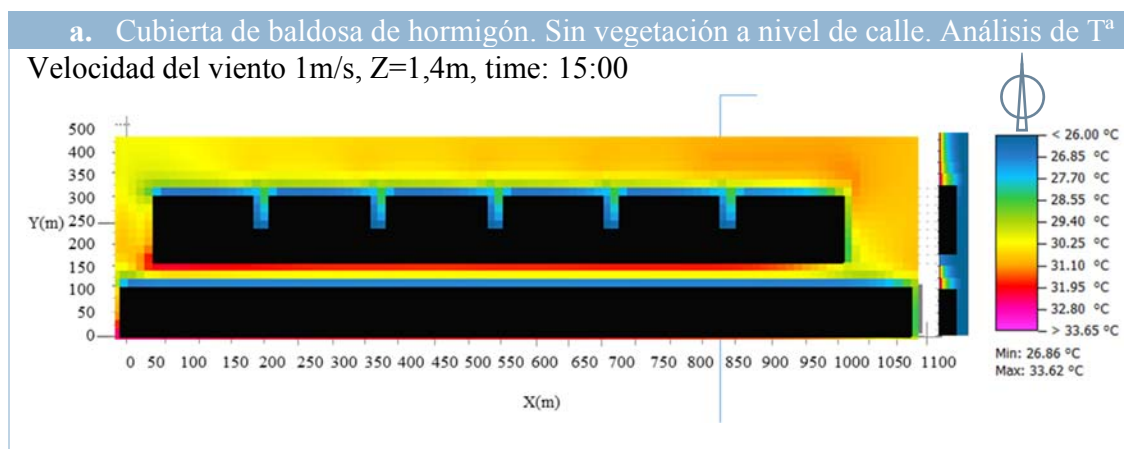


Ilustración 11 Resultados de ENVI-met el escenario con cubierta de hormigón calles pavimentadas con asfalto y hormigón.

b. Cubierta de baldosa de hormigón con árboles a pie de calle. Análisis de temperatura

Velocidad del viento 1m/s, Z=1,4m, time: 15:00

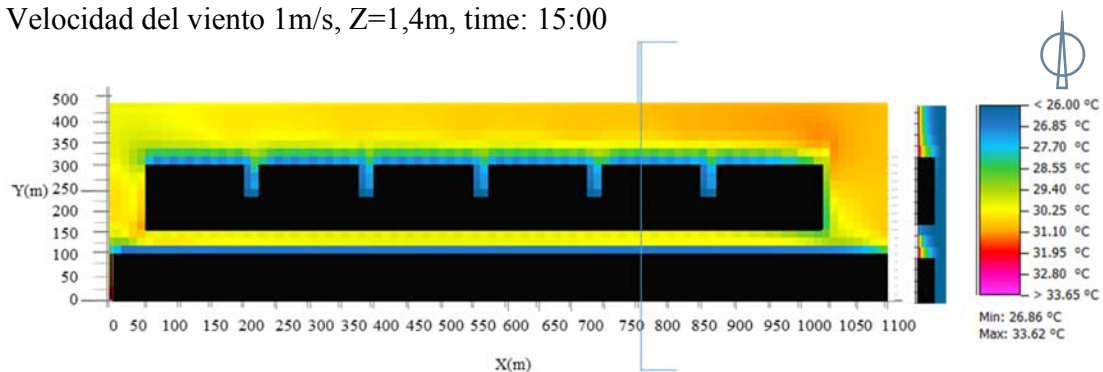


Ilustración 12 resultados de ENVI-met el escenario con cubierta de hormigón y árboles en calle

Los resultados de estas simulaciones muestran que la inclusión de árboles a pie de calle tiene un efecto muy positivo sobre la reducción de temperaturas del aire, registrándose reducciones en las temperaturas entre 0,8 °C en la fachada sombreada y 1,8°C en la fachada soleada, debido al efecto de sombreado de la vegetación. La siguiente figura muestra el diferencial de temperaturas (K) entre ambos escenarios:

Diferencial de Temperaturas  $\Delta T$  (K). BAU con y sin vegetación a pie de calle (A B)

Velocidad del viento 1m/s, Z=1,4m, time: 15:00

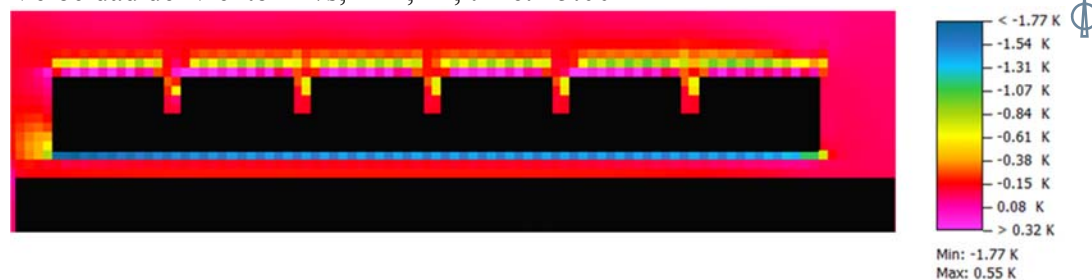
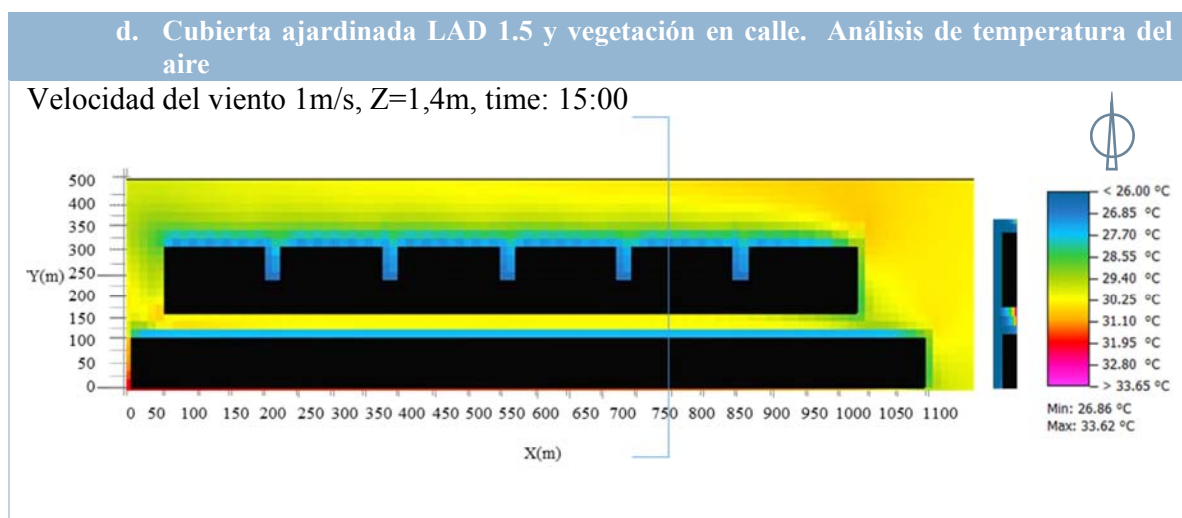
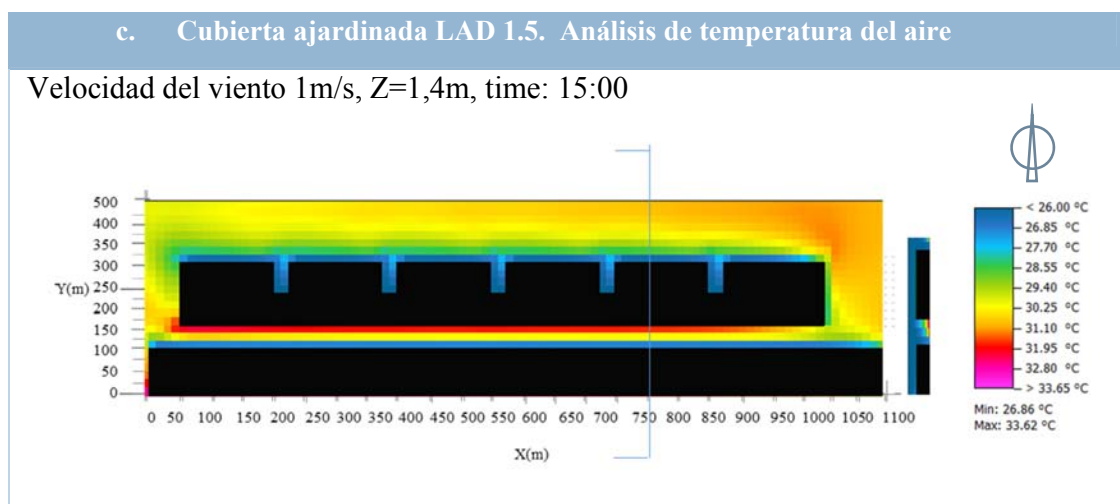


Ilustración 13 Diferencial de temperatura  $\Delta T$  (K) entre el escenario a y b.

A continuación, se han realizado las simulaciones que reflejan el escenario con cubierta vegetal de LAD 1.5 y del mismo modo que en caso anterior, se ha simulado con y sin arboles a pie de



calle para evaluar el impacto independientemente y combinado. Las siguientes imágenes muestran los resultados de estas simulaciones:



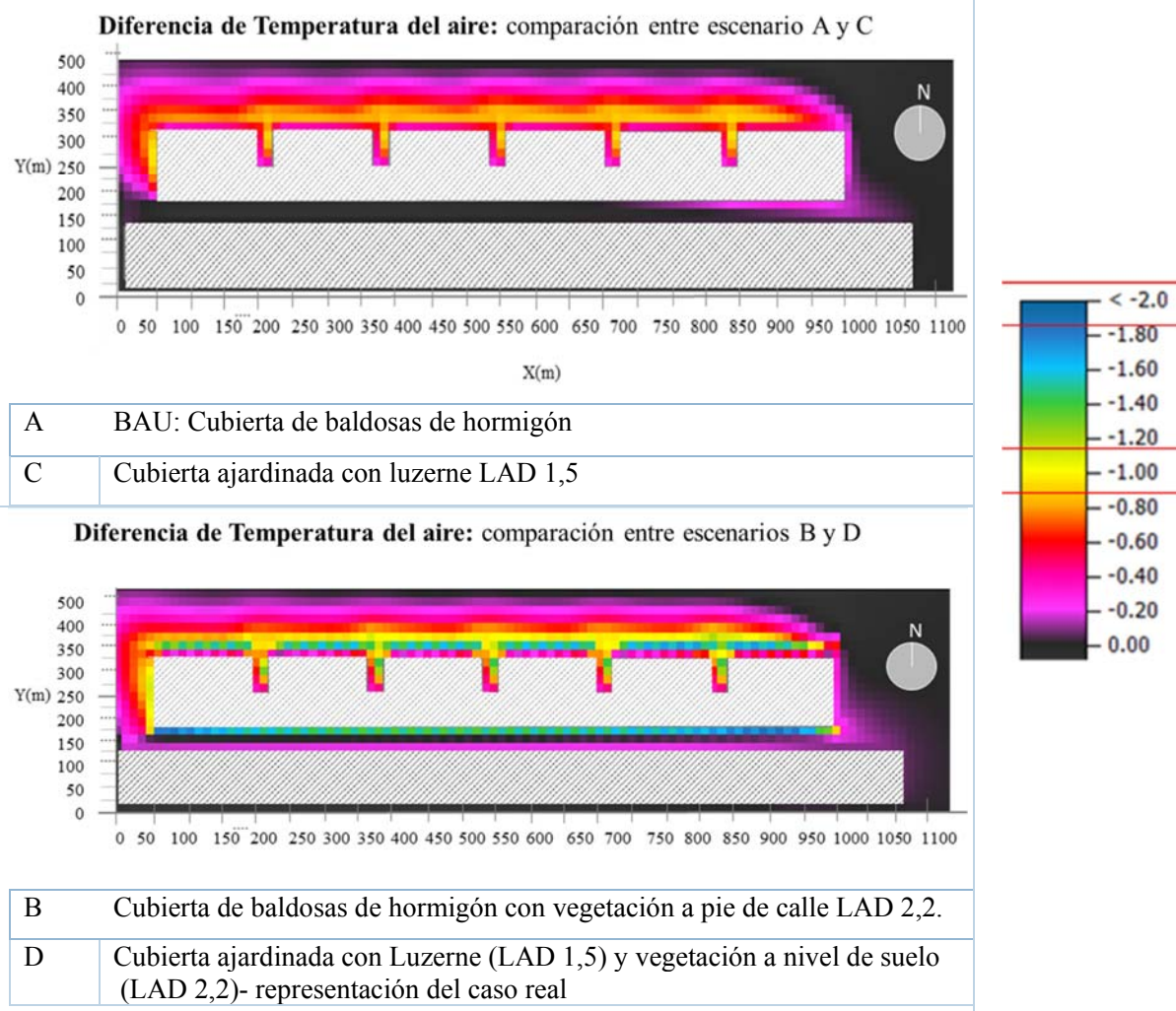
Los resultados muestran el efecto de la vegetación a pie de calle, mostrando unas reducciones de temperatura mayores que con solo la cubierta ajardinada, del orden de 2°C .La humedad relativa en cambio, presenta variaciones menores a un 1% en todos los casos analizados.

En base a los resultados se han comparado las soluciones de cubierta de hormigón y vegetal sin vegetación a pie de calle y con ella. De esta forma se puede identificar el impacto de la cubierta ajardinada sobre la temperatura y humedad con independencia de los otros sistemas vegetales

en el entorno. Las siguientes figuras muestran los diferenciales de temperatura  $\Delta T$  medido en grados Kelvin que se dan entre los escenarios, usando la cubierta vegetal como elemento diferencial en ambos casos (con y sin árboles a pie de calle).



## Diferencial de $T^a$ $\Delta T$ (K) entre los escenarios analizados



La comparación entre los escenarios con vegetación a pie de calle y sin ella se muestran en la siguiente figura. A pesar de que por sí sola la vegetación a pie de calle induce mejoras significativas en la reducción de temperaturas del aire, su efecto en los casos en los que hay cubierta ajardinada potencia el efecto aislado que tendría la cubierta sobre la temperatura de la calle. El siguiente gráfico muestra cómo en presencia de la cubierta ajardinada, el impacto conjunto de ambos sistemas aumenta en relación a la contribución individual de cada sistema. Sin vegetación a pie de calle, el efecto de la cubierta ajardinada se cuantifica en un rango entre 0,5 y 1 °C, lo que coincide con los datos extraídos del estudio teórico. En presencia de vegetación a pie de calle, el efecto combinado de ambos elementos se manifiesta en unas

reducciones relativas de hasta 2°C, duplicando el efecto individual de la cubierta. La figura siguiente muestra la comparación entre las temperaturas calculadas por el modelo a las 15:00 en los puntos de medición 01 y 02 (fachada sombreada y soleada respectivamente).

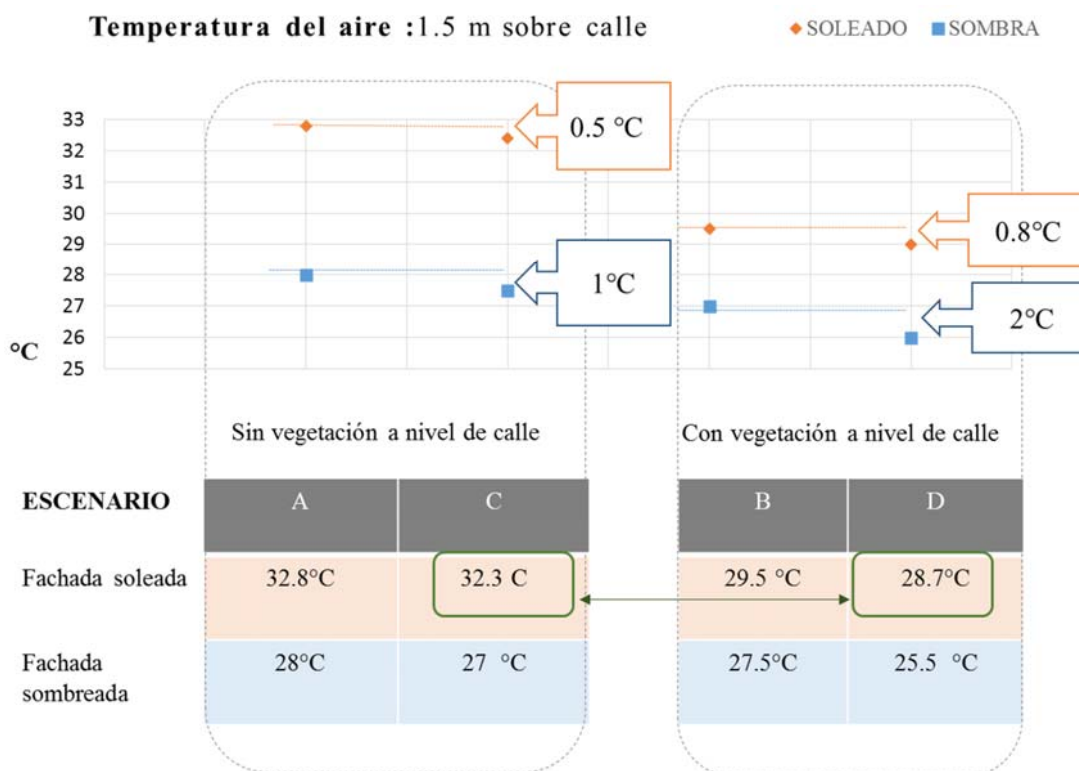


Ilustración 14 Temperaturas en los puntos de medición a las 15:00 a 1,4 m sobre el nivel de calle en los escenarios analizados.

La comparación A\_C muestra el efecto aislado de la cubierta ajardinada, sin vegetación a nivel de calle, que produce reducciones en la temperatura del aire entre 0,5 y 1°. C. La comparación en los casos con vegetación a pie de calle B\_D, muestra que estas reducciones se incrementan entre 0,8 y 2°C, lo que muestra como la vegetación a pie de calle potencia el efecto refrigerante de la cubierta.

Comparando el escenario A con el escenario D, se observan reducciones globales de hasta 3,6°C por el efecto combinado de la cubierta ajardinada con los árboles.

Este resultado muestra que el efecto de la cubierta ajardinada se potencia con la presencia de vegetación a nivel de calle.

#### 10.6 CONCLUSIONES PARCIALES

De este segundo análisis se han obtenido las siguientes conclusiones parciales:

- En condiciones de baja velocidad de viento, la reducción de temperatura del aire producida por la influencia de la cubierta ajardinada depende principalmente de la densidad de la vegetación de la cubierta (LAD).
- En cubiertas de vegetación densa la máxima reducción de temperatura a nivel de calle alcanza 1 °C en la fachada sombreada y 0,5 °C en la fachada expuesta a la radiación
- En combinación con vegetación a pie de calle, la cubierta ajardinada potencia su efecto aumentando la reducción de temperaturas relativa de hasta los 2 °C en la fachada sombreada y 0,8 °C en la soleada.
- Las reducciones de temperatura totales por el efecto combinado de la vegetación a nivel de calle y la cubierta ajardinada alcanzan los 3,6 °C en relación al edificio sin vegetación.
- Las reducciones en la fachada soleada son mínimas, en el límite del margen de error del software (0,5 °C).

## 11. ESTUDIO ENERGÉTICO

En base a los perfiles de temperatura extraídos de ENVI-met, se ha evaluado la influencia del microclima en la demanda energética de los edificios que delimitan el entorno analizado.

Dada la naturaleza del edificio de la T4, se ha realizado una simulación asumiendo que el edificio está totalmente cerrado, ocupado y climatizado. Las simulaciones se han efectuado con el software Design Builder v4, que usa Energy Plus como motor de cálculo. Este software se usa a nivel mundial y su principal ventaja es la capacidad de simular dinámicamente las interacciones e intercambios de calor entre el edificio especificado por la arquitectura y las instalaciones diseñadas por la ingeniería de forma horaria a lo largo de un año periodo que comúnmente es un año climático tipo, Typical Meteorological Year ( TMY). Para determinar datos de un TMY, diversas mediciones meteorológicas se toman en intervalos horarios durante varios años para construir una imagen del clima local. Un promedio simple de los datos anuales subestimaría la cantidad de variabilidad, por lo que para el TMY se selecciona el mes que es más representativo de esa ubicación. Para cada mes, se determinan los valores promedio durante el período de medición entero. Los datos para el mes que tiene los valores promedio más estrechamente igual al promedio mensual durante el período de medición entero son elegidos como los datos horarios del TMY para ese mes. Este proceso entonces se repite para cada mes en el año. Los meses se agregan juntos para dar un año de muestras por hora.

### 11.1 DATOS DE ENTRADA

#### Datos climáticos

El año climático para Madrid empleado es el IWEC (International Weather for Energy Modelo eQuest Calculations) desarrollado por ASHRAE y representa un año tipo. Dado que los perfiles de temperatura se han obtenido en base a los datos extraídos por ENVI-met para el día 9 de Julio, el fichero del año tipo se ha modificado en este día para capturarlo en la simulación energética.

La simulación se ha realizado para el mes de Julio en base al fichero modificado. La siguiente figura muestra la comparación de temperaturas entre el perfil horario original y el modificado con los datos de ENVI-met para las 24 horas del 9 de Julio bajos la influencia de la vegetación de acuerdo con los resultados de la simulación en el escenario D.

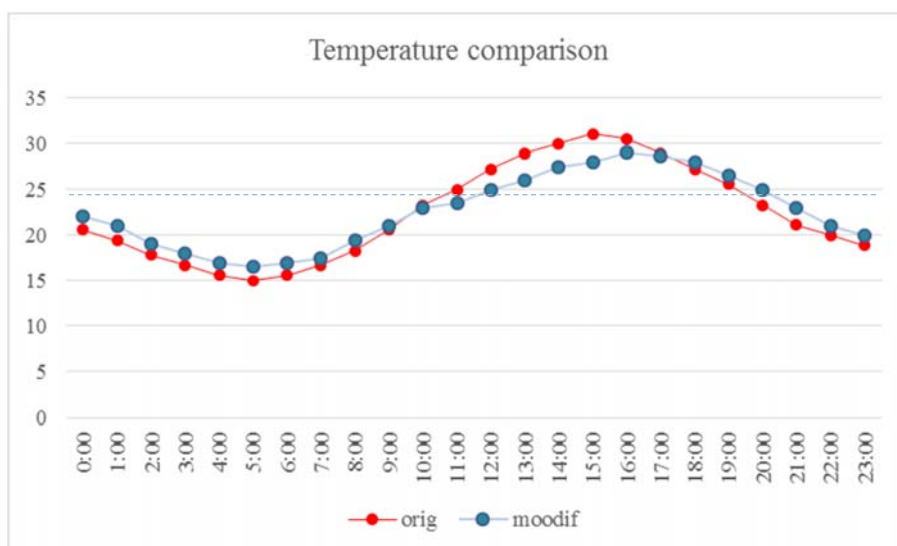


Ilustración 15 Comparación de perfiles de temperaturas, actual versus modelada.

#### Definición del modelo

Tanto el sistema de clima como las propiedades térmicas de los cerramientos se han mantenido por defecto los propuestos por Design Builder para la zona climática de Madrid que es la numero 4 según la definición del estándar ASHRAE 90.1. ASHRAE 90.1 es un estándar desarrollado en Estados Unidos por la American Society of Heating Refrigerating and Air conditioning Engineers (ASHRAE) y proporciona requisitos mínimos para diseños eficientes de energía para los edificios excepto edificios residenciales de baja altura. El estándar original, 90 ASHRAE, fue publicado en 1975. Y se actualiza continuamente en base a cambios rápidos de tecnología energética y precios de la energía.

El motivo para la selección de este estándar ha sido el carácter internacional de esta investigación. ASHRAE 90.1 es un estándar altamente reconocido y usado como referencia de eficiencia energética mundialmente. En esta simulación se ha usado como referencia para

seleccionar los sistemas tanto constructivos como mecánicos, usando los valores por defecto requeridos para la zona climática de Madrid. Los valores que definen el edificio de cara a la simulación; cerramientos, equipos y cargas internas, se muestran a continuación;

### Geometria

El edificio se ha modelado como un espacio de una sola zona, de uso oficinas. Se le ha dado los valores por defecto de ASHRAE 90.1 a los diferentes tipos de cerramiento..

Cerramientos	Definición	U value ( W/m <sup>2</sup> K)
<b>Fachadas</b>	Panel metálico	0.365
<b>Acristalamiento</b>	Doble acristalamiento	2.27
<b>Cubierta</b>	Cubierta de losas de hormigón con aislamiento	0,273
<b>Forjados</b>	Forjado reticular de hormigón	0,496

### Cargas internas

La tabla siguiente presenta las hipótesis presentadas para las cargas internas. A efectos de este análisis solo se ha tenido en cuenta la densidad de iluminación, que es comúnmente la carga más crítica en edificios de uso de oficina.

Cargas	( W/m <sup>2</sup> )
<b>Iluminación</b>	12

### Sistemas

El Sistema de refrigeración se ha mantenido el asignado por defecto por Design Builder, con una eficiencia definida por el Coefficient of Performance (COP) de 2,8. El punto de consigna de refrigeración se ha mantenido a 26°C para hacer el cálculo de la demanda.

## 11.2 RESULTADOS

Los resultados horarios de la simulación muestran una reducción de la demanda horaria durante el día modificado (9 de Julio) de 2Wh/m<sup>2</sup> en la hora pico para mantener la temperatura de

consigna en el interior, que se traduce en una reducción diaria de un 14% respecto a la simulación con los datos del año tipo para ese día tal y como muestran las siguientes figuras:

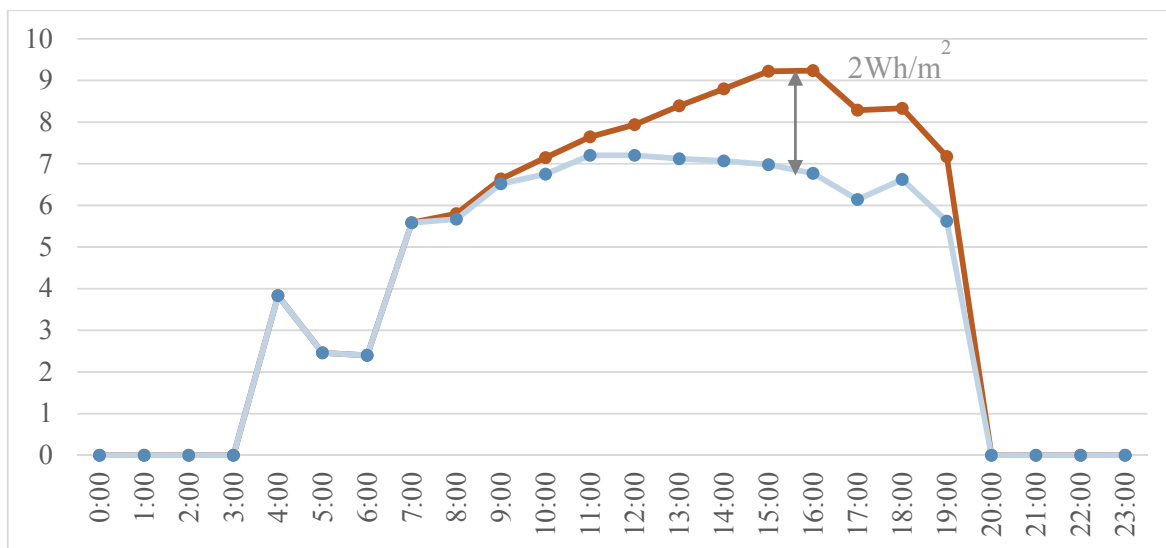


Ilustración 16 demanda horaria en el edificio

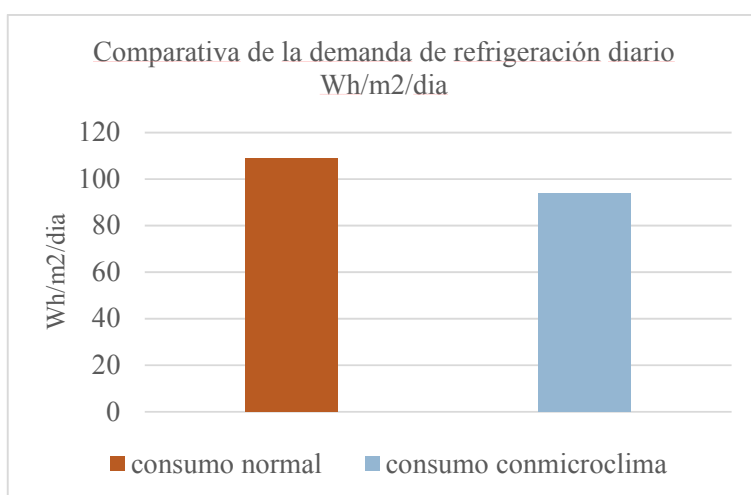


Ilustración 17 Demanda diaria de refrigeración

La transferencia de calor a través del cerramiento, y por tanto la demanda energética, son proporcionales al diferencial de temperaturas entre el interior y el exterior del edificio. El  $\Delta T$  se reduce entre 1 y 2°C en las horas de mayor demanda de refrigeración del día, y resultan en una reducción de un 14% de la demanda en el día simulado, lo que demuestra que el microclima resultante alrededor de los edificios por el efecto de la cubierta ajardinada tiene un impacto sobre el consumo energético de los edificios.



## 12. CONCLUSIONS

This study has led to conclusions based in both, the effect of the green roof in the urban canyon microclimate and the tool used for the analysis.

- Identificar los modelos numéricos y herramientas de cálculo capaces de capturar el efecto de la cubierta ajardinada sobre el microclima.
- Identificar los parámetros potenciadores o limitadores de este efecto
- Cuantificación del impacto del microclima generado sobre el consumo energético de los edificios
- The main conclusion, is that the results of the theoretical and the experimental studies, align with the initial hypothesis of this research, showing that the green roof impacts the microclimate at street level in the street canyon, reducing air temperature in comparison with urban environments featuring standard concrete roofs in their buildings.

In response to the thesis objectives, the following conclusions can be drawn:

- The calculation methods and models used so far for evaluating microclimates face the difficulty of finding algorithms able to simplify the complex physical and dynamic processes determining the microclimate in order to develop neighbourhood scale models without large computational and time requirements. Although the numerical models are evolving towards co-simulation, there is no simple way yet to study microclimates, even when confined in urban canyon models which are more known and predictable.
- From the models evaluated, both BES and CFD models, the one selected for this analysis is ENV- met 4 because is the one which aligns better with the objectives of this thesis. All the fundamental algorithms are embedded in the ENVI-met core system and at the same time, the modelling process is relatively simple.
- The results of the experimental study have shown that ENVI-met reflects closely the temperature and humidity characterizing the microclimate generated around the building with and without green roofs and urban forestry, although it shows limitations

- One important limitation of the software is the turbulence model embedded in its structure. The calculation process becomes unstable under low reference wind conditions  $\leq 0,5$  m/s and cannot produce reliable results. The default turbulence model in ENVI-met does not support low wind speeds, but can be modified in the professional version of ENVI-met. Additionally the grid and cell size allowed by the software limit the scale of the analysis and the data bases for the definition of building and plants, are limited and the inclusion of new data required a level of detail that makes difficult the inclusion of new plants and materials.

Even considering the above limitations, for the purpose and model conditions, overall, ENVI met reproduces the green roof effect with low error in relation to the measurements and has proven to be a valid software for the purpose of evaluating the effects of green roofs on urban microclimates.

- In relation to the identification of factors enhancing or diminishing the green roof effect, the effect of green roofs though, is limited and it is largely affected by wind speed and sun radiation conditions. As previously analyzed, higher wind speeds increase turbulence phenomena and reduce the capacity of the vegetation canopies to retain cooler air underneath, thus reducing its cooling potential. Similarly, direct sun radiation increases building and street surfaces temperature, which heats the surrounding. This hot air rises and prevents the cooler air coming from the green roof to get to the pedestrian level. Therefore, wind and radiation can be deemed as limiting factors when evaluating green roof performance.
- On the other hand, the Leaf Area Density can be also a critical parameter given the strong influence on the roof performance, however, it is also an enhancement if the vegetation is selected wisely.
- The cooling capacity of the green roof is higher in the scenario with higher LAD. In this case, under calm wind and shaded conditions, the maximum temperature decrease registered is lower than 1°C. This cooling effect can be potentiated by the inclusion of

vegetated areas at street level. The results of the model, show air temperature reductions up to 2 °C in the points where trees are located nearby the building, showing their strong influence on the microclimate. Instead, relative humidity remained with minimum differences (lower than 1%) in all the scenarios analyzed, therefore, in this case, the effect of the green roof is mainly on air temperature.

- During the measurement campaign it was noticed that the temperatures above the soft irrigated areas in the green roof affected canyon, were much lower than those above hard surfaces, highlighting the effect of evaporative cooling coming from the moist ground. Differences up to 5°C at 1 m above the ground were registered between areas with moist soil and hard surfaces. This show that the green roof effect can be further enhanced by the inclusion of soft landscape and wet surfaces around the building, reaching temperature reductions up to 5°C at pedestrian level (1.4 m).
- For the Madrid summer climate characterized by low wind speeds ranging from 0 to 3 m/s, the influence of the green roof can be noticeable, especially in street canyons with an aspect ratio close to 1, transversal wind directions and featuring a vortex type wind turbulence pattern, where the wind speeds within the canyon are low.
- The temperature profile generated around the building has a direct effect on the buildings energy performance. The energy analysis conducted with the calculated daily temperatures, showed a 14% reduction on overall energy demand for the day when green roofs influence the urban canyon. This is very relevant and can should be further investigated, since the impact of green systems in energy performance could help decision makers to build a business case and favour the installation of green roofs and other types of green infrastructure.
- Relative humidity has been tracked during the process, but variations were minimal in both, the theoretical model and the experimental one.

Further studies should be conducted at larger scale to evaluate the overall temperature regulation that green roofs can provide at city level. This effect is dramatically affected by the wind, the LAD of the vegetation type selected for the roof, the presence of trees in the surrounding streets and shading elements avoiding the direct sun radiation.

Based on the above, the combined effect of green roofs, urban forest and moist-porous surfaces shows the potential for becoming an adaptive strategy able to cope with the effects of climate change in urban microclimates.

### 13. LINEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA

- Existe un gran potencial para la refrigeración mediante la inclusión de suelos saturados en áreas urbanas. Este efecto debería estudiarse en estudios futuros como estrategia de regulación del microclima en las áreas urbanas. Tanto las mediciones in situ como el modelo muestran reducciones en la temperatura del aire de hasta 4,5°C a nivel peatonal por el efecto combinado de las cubiertas y el suelo poroso húmedo.
- El efecto de la densidad de vegetación es muy significativo en las cubiertas ajardinadas y debería realizarse un estudio más detallado de su influencia sobre el microclima.
- Las variaciones geométricas de la edificación con cubierta ajardinada y sus alturas se deberían estudiar en profundidad, así como la integración de elementos vegetales a diferentes alturas del edificio para evaluar su influencia sobre el microclima urbano.
- Este estudio es particular para climas mediterráneos. Para poder evaluar de forma global esta estrategia es necesario que se evalúen climas diferentes y se determinen los patrones de este efecto.
- Esta investigación se ha centrado en la temperatura y humedad, pero otros factores que determinan el microclima son igualmente importantes y deberían ser estudiados, i.e temperatura media radiante, indicadores de confort térmico,...

## 14. BIBLIOGRAFÍA

- AEMET. (2015). *Standard Climate Values: Madrid*. Madrid: AEMET;  
<http://www.aemet.es/en/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=3195&k=mad>.
- AEMET, A. E. (2009). *Generación de escenarios regionalizados para el cambio climático*. Madrid: Ministerio del Medio Ambiente.
- AEMET, A. E. (2012). *Guía resumida del clima en España (1981-2010)*. Madrid: AEMET.
- Ajuntament-de-Barcelona. (2011). *Plan Verde y de Biodiversidad de Barcelona 2020*. Barcelona.
- Akbari, & J.Huang, S. D. (1992). *Cooling our communities: A guidebook on tree planting and light colored surfacing*. Pittsburg: Government Printing Office.
- Akbari, H. (2010). *Opportunities for Saving Energy and Improving Air Quality in Urban Heat Islands*. Berkeley: Lawrence Berkeley Laboratory.
- Alessandro, S., Barbera, G., & Silvestrini, G. (1987). *Stato dell'arte delle ricerche concernenti l'interazione energetica tra vegetazione de ambiente costruito*. Palermo.
- Allen, L., Lindberg, F., & Grimmond, C. (2011). Global to city scale urban anthropogenic heat flux:. *International Journal of Climatology* (31) 13, 1990-2005.
- Arnfield, A. J. (1990). Street Design and Urban Canyon Solar Access. *Energy and Buildings*, 14 , 131 117.
- Arup. (2014). Cities Alive.
- ASHRAE, A. S.-c. (2013). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, ASHRAE 55-2013*. Atlanta.
- Bansal, N. K. (1994). *Passive Building Design, a Handbook of Natural Climatic Control*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Blanusa, T. V. (2012). Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better cooling service? *Building and Environment*, 59. , pp. 99-106.

- Blanus, T., Monteiro, M. M., Fantozzi, F., Vysini, E., Li, Y., & Cameron, R. W. (2012). Alternatives to Sedum on green roofs: Can broad leaf perennial plants offer better ‘cooling service’? *Building and Environment*.
- Bonan, G. (2002). *Ecological Climatology*. Cambridge University Press .
- Bratmana, G. N., Hamilton, J. P., Hahnc, K. S., Dailyd, G. C., & Grossc, J. J. (2015). Nature experience reduces rumination and subgenual prefrontal cortex activation. *Proceedins of the Natural Academy of Sciences of the United States of America*; vol. 112 no. 28, 8567–8572.
- British-Research-Establishment. (2013). *BREEAM Commercial*.
- Britto-Correa. (2002). *Comportamiento Térmico de las Cubiertas Ajardinadas-Tesis Doctoral*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Brown, R., & Gillespie, T. (1995). *Microclimatic lansdcape Design : Creating thermal confort and energy efficiency*. New York: John Wiley & Sons.
- Bruntland. (1987). *Nuestro Futuro Común*.
- Bruse, M. (1 de June de 2015). Obtenido de EnviMET: <http://www.model.envi-met.com/hg2e/doku.php?id=root:start>
- Bruse, M. (20 de Novembert de 2015). *ENVI-met*. Obtenido de <http://www.model.envi-met.com/hg2e/doku.php?id=intro:modelconept>
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating Surface-Plant Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model. *Environmental Software and Modelling*, 13, 373-384.
- Bruse, M., & Fleer, H. (1998). Simulating surface–plant–air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. . *Environmental Modelling and Software*, 13, 373–384.
- C.A., F. (1971). Effects of Trees in Modifying Urban Microclimate. . *Symposium onTrees and Forests in an Urbanizing Environment*. Amherst, MA, Aug.18-21: University of Massachusetts, Cooperative Extension Service.

- Campbell, G. S., & Norman, J. M. (1998). *An introduction to Environmental Biophysics*. Springer Science & Business Media.
- Chen, L., Ng, E., An, X. R., C., L. M., Wang, U., & He, Z. (2012). Sky view factor analysis of street canyons and its implications for daytime intra-urban air temperature differentials in high-rise, high-density urban areas of Hong Kong: a GIS-based a GIS-based simulation approach. *International Journal of Climatology*, vol 32, 121-136.
- City-of-Toronto. (2009). *City of Toronto By-law No.583-2009*. Toronto.
- City-of-Toronto. (2010). *Toronto Green Roof Construction Standard- Supplementary Guide*. Toronto.
- Clapp, B., & Hornberger, G. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties,. *Water Resource*, 14, :601–604.
- Cohen-Cline, H., Turkheimer, E., & Duncan, G. E. (2015). Access to Green Space, Physical Activity and Mental Health: a Twin Study. *Journal of Epimiology and Mewnth Health* vol 69, 523-529.
- Cook, D., & Vanhaverbeke, D. (1977). Suburban noise control with plant material and solid barriers. *Conference on Physical Metropolitan Environment*, (págs. 234-242). New York.
- Cordero, X. (2014). *Microclima y Confort Térmico Urbano*. Barcelona.
- Dauzat, J., Rapidel, B., & Berger, A. (2001). Simulation of leaf transpiration and sap flow in virtual plants: model description and application to a coffee plantation in Costa Rica. *Agricultural and Forest Meteorology* 109, 143-160.
- Del Barrio, E. p. (1998). Analysis of the Green Roofs Cooling Potential in Buildings. *Energy adn Buildings*, 27, 179-193.
- Depaul, F. T., & Sheih, C. M. (1986). Measurements of wind velocities in a street canyon. *Atmospheric Environment* 20, 455-459.
- Dessi, V. (2007). *Progettare il comfort urbano* . Napoli: Grupo editorial Esselibri-Simone.



- Djedjig, R., E. B., & Belarbi, a. R. (2013). Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 1-11.
- Dunnett, D., & Kingsbury, N. (2004). *Planting green roofs and living walls*. Portland, oregon: Timber Press Inc.
- Dunnett, N. (2006). Green Roofs for Biodiversity: Reconciling Aesthetics with Ecology. *Fourth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference*,. Boston.
- Environment, F. C. (1971). "Effects of Trees in Modifying Urban Microclimate".
- Erell, E. P. (2012). *Urban microclimate: designing the spaces between buildings*. Routledge.
- Erell, E., Pearlmutter, D., & Williamson, T. (2011). *Urban Microclimate: Designing the Spaces Between Buildings*. New York: Taylor & Francis group.
- Eumorfopoulou, E., & D.Aravantinos. (1998). The Contribution of a Planted Roof to the Thermal Protection of Buildings in Greece". *Energy and Buildings. Vol 27*, 29-36.
- Fariña, J. (1998). *La ciudad y el medio natural*. Madrid: Akal.
- Federer, C. (1970). Effects of Trees in Modifying Urban Microclimate. *Symposium on Trees and Forests in an Urbanizing Environment*. Amherst, MA,: University of Massachusetts, Cooperative Extension Service.
- Flor, F. S., & Domínguez, S. A. (2004). Modelling Microclimate in Urban Environments and Assessing its Influence on the Performance of Surrounding Buildings. *Energy and Buildings. Vol 36*, 403-413.
- Fomento, M. d. (2004).
- Frazer, L. (2005). Paving Paradise: the peril of Impervious Surfaces. *Environmental health Perspectives 113 N°7*, 457-462.
- Gal, T., Rzepa, M., Gromek, B., & Unger, J. (2007). Comparison between sky view factor values computed by two different methods in an urban environment. *Acta Climatologica et Chorologica vol 40-41*, 17-26.

- Gates, D., Keegan, H., J.C.Schleter, & V.R.Weidner, a. (1965). Spectral Properties of Plants. *Applied Optics Vol. 4, No. 1*, 11-20.
- Geiger, R., Aron, R. H., & Todhunter, P. (1927). *The Climate near the ground*. Harvard Univertisy Press.
- Georgakis, C., & Santamouris, M. (2005). Canyon effects: Calculation of wind speed in an urban street canyon with. *International Conference "Passive and Low Energy Cooling forthe Buildt Environment"*, (págs. 117-124). Greece.
- Getter, K., Rowe, D., Robertson, G., Cregg, B., & Andresen., J. (2009). Carbon sequestration potential of extensive green roofs. . *Environ Sci Technol*, 43 , pp. 7564–7570.
- Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Goudriaan, J. (1986). A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agriultural and Forest Meteorology* 38, 249-254.
- Green Roof for Healthy Cities. (2012). *Citylab*. Obtenido de <http://www.citylab.com/design/2012/04/what-cities-can-learn-torontos-green-roof-policy/1846/>
- Griffiths, I., Huber, J., & Baillie, A. (1987). Integrating the environment. *European Conference on Architecture proceedings , Steemers & Palz*,. Netherlands: (Eds.) Kluwer Academic for CEC.
- Grimmond, C., Potter, K., Zutter, H., & Souch, C. (2001). Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas. . *International Journal of Climatology*, 21(1), 903-913.
- Guerra M., J., D.S., A., J.L., M. F., & R., V. V. (1994). *Guía básica para el acondicionamiento climático de espacios abiertos*. Madrid: CIEMAT.
- Gutiérrez, J., Cofiño, A.S., S.-M., D., S., C.M., F. M., Fernández, J., . . . Ancell, R. (2009). "Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts".

- H., G., Barriat, P., Lefebvre, W., Loutre, M., & V. Zunz. (2008-2010). *Introduction to climate dynamics and climate modeling*. Online textbook available at <http://www.climate.be/textbook>.
- Haeckel, E. (1869). *Generelle Morphologie der Organismen*, vol I p.8. Berlin.
- Halsnæs, K. P. (2007). *Framing issues in Climate Change : Mitigation. Contribution of working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge (UK) and New York (USA): Cambridge University press.
- Heisler, G. M. (1989). *Site design and microclimate research*. University Park, PA: U.S. Dept of Agriculture Forest Service.
- Hernández, A. J., Urcelai, A., & Pastor, J. (2002). *Evaluación de la resiliencia en ecosistemas terrestres degradados encaminadas a la restauración ecológica*.
- Higueras, E. (1998). *Urbanismo Bioclimático. Criterios Medioambientales en la Ordenación de Asentamientos*. Madrid: Instituto Juan de Herrera. Universidad Politécnica de Madrid.
- Higueras, E. (2006). *Urbanismo Bioclimático*. Barcelona: Gustavo Gili, ISBN 978-84-252-2071-5; 84-252-2071-8.
- Hoerbert, M., & Kirchgeorg, A. (1982). Climatic and air hygienic aspects in the planning of inner-city open spaces: Berliner grosser tergarten. *Energy and Buildings* vol.5 no.1 .
- Honjo, T. T. (1990-1991). Simulation of thermal effects of urban green areas on their surrounding areas. *Energy and Buildings* 15., 443–446.
- Hosler, C., & H.E. Landsberg. (1977). The effect of localized man-made heat and moisture sources in mesoscale weather modification. *Energy and Climate*.
- Hosoi, F. &. (2009). Estimating vertical leaf area density profiles of tree canopies using three-dimensional portable LiDAR imaging. *Proceedings of the ISPRS workshop Laser-scanning Vol 9*, (págs. 152-157).
- <http://quees.la/microclima/>. (s.f.).
- Hudekova, Z., Krajcsovic, L., Martin, P., Pauditšová, E., & Reháčková, T. (2007). *Ecological footprint, climate change and cities*. Bratislava.

- Hufty, A. (2001). Classification des climats de Köppen. En A. Hufty, » *dans Introduction à la climatologie: Le rayonnement et la température, l'atmosphère, l'eau, le climat et l'activité humaine* (pág. 12). Laval: Presses Université Laval.
- Huttner, S., Bruse, M., Dostal, P., & Katzschner, A. (2009). Strategies for mitigating thermal heat stress in central european clities: The project KLIMES. *Poster and extended abstract from the 2009 ICUC-7 conference*. Yokohama.
- IPCC. (2014). *Quinto Informe de Evaluación del Cambio Clmático*.
- Jaffal, I., Salah-Eddin, & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the innpact of Green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, volume 43,, 157-164.
- Johnston, J., & Newton., J. (1996 ). *Building Green, a Guide for Using Plants on Roofs, Walls and Pavements*. London: The London Ecology Unit. .
- Jones, H., & Vaughan, R. (2010). *Remote sensing of vegetation: principles, techniques and applications*. New York: Oxford University Press.
- Junnila, S., & Horvath, A. (2003). Life-Cycle Environmental Effects of an Office Building. *Journal of Infrastructure Systems*, Vol. 9, No. 4, 157-166.
- Karen C.Seto, B. G. (2012). Global forecast of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *PNAS*, 16083-16088.
- Kastner-Klein, P, Berkowicz, R., & Britter, R. (2004). The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics* 87, 121–131.
- Kastner-Klein, P., Fedorovich, E., & Rotach, M. W. (2001). A wind-tunnel study of organised and turbulent air motions in urban street canyons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89, 849–861. doi:10.1016/s0167-6105(01)00074-5.
- Kato, S. &. (2007). Estimation of storage heat flux in an urban area using ASTER data. . *Remote Sensing of Environment*, 110(1), 1-17.

- Kato, S., & Yamaguchi, Y. (2005). Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, 99(1), 44-54.
- Kim, J., & Baik, J. J. (1999). A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons. *Journal of Applied Meteorology* 38, 1249–1261. doi:10.1175/1520-0450(1999)038
- Kimes, D., & Smith, J. (1980). Simulation of Solar Absorption in Vegetation Canopies. *Applied Optics*, Vol 19(16), 2801-2811.
- Kobayashi, M., Pereira, J., & Siqueira, M. (1994). Numerical study of the turbulent flow over and in a model forest on a 2D hill. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 53, 357-374.
- Köhler, M. (2003). Plant survival research and biodiversity. lessons from Europe. . *Proceedings of the first Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities Conference* . Chicago.
- Kottek, M. G. (2006). "World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated". *Meteorol. Z.* 15, 259–263.
- Krier, R. (1975). *Urban Space*. Germany: Academy Editions.
- Krusche, P. (1982). *Ökologisches bauen*. Berlin: Bau Verlag.
- Kumar, R. &. (2005). Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings. *Building and Environment*, 40 (11), 1505-1511.
- Landa, M. d. (1999). The nonlinear development of cities. En A. Marras, *ECO-TEC: Architecture of the in between* (págs. 24-32). New York: Princeton Architectural Press.
- Landscape-Institute. (2013). *Green Infrastructure: An Integrated Approach to Land Use*.
- Launder B.E. and Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. En D. B. Launder B.E. and Spalding, *Computational Methods Applied to Mechanical Engineering* (págs. 269-289).
- Linacre, E., & Geerts, B. (1997). *Climates and Weather Explained*.

- Lipp, D. (2014). El cañon urbano, su incidencia en la calidad del aire. *Actas Congreso Internacional de Geografía . 75° Semana de Geografía* , (págs. 123-128).
- Lowry. (1991). *Atmospheric Ecology for Designers and Planners* . New York: Van Nostrand.
- Loyola, M. D. (2003). *Ecología y medio ambiente*. Mexico: Progreso.
- Lundholm, J. T. (2006). Green roofs and facades: a habitat template approach. . *Urban habitats*, 4(1), 87-101.
- Madrid, A. d. (2014). *Plan de Energía y Cambio Climático de la ciudad de Madrid - Horizonte 2020*. Madrid.
- Mentens, J. R. (2006). Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century? *Landscape and urban planning*, 77(3), 217-226.
- Miguet, F., & Groleau, D. (2002). A daylight simulation tool for urban and architectural spaces. Application to transmitted direct and diffuse light through glazing. *Building and Environment* 37, 833–843.
- Monteith, J., & Unsworth, M. (1991). *Principles of Environmental Physics*. New York: Edward Arnold.
- Nakamura, Y., & Oke, T. (1988). Wind temperature and stability conditions in an E-W oriented urban canyon,. *Atmospheric Environment*.
- Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon. *Atmospheric Environment*, 22(12). *Atmospheric Environment* (, 2691-2700.
- Niachou, A., K.Papakonstantinou., Santamouris, M., Tsangrassoulis, A., & Mihalakakou, G. (2001). Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance . *Energy and Builidngs Vol 33*, 719-729.
- Nikolopoulou, M., & Steemers, K. (2003). Thermal Comfort and Psychological Adaptation as a Guide for Designing Urban Spaces. *Energy and Builidngs*, vol35, 95-101.
- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (1999). Thermal Comfort in Urban Space: Different Forms of Adaptation. *REBUILD 1999: The Cities of Tomorrow*. barcelona.

- Nikolopoulou, M., Baker, N., & Steemers, K. (s.f.).
- Nikolopoulou, M., S. L., & Kikira, M. (1999). *THERMAL COMFORT IN OUTDOOR SPACES: FIELD STUDIES IN GREECE*. Greece.
- Nunez, M., & Oke, T. R. (1977). The Energy Balance of an Urban Canyon. *Journal of Applied Meteorology* 16, 11–19.
- Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R., Doshi, H., Dunnet, N., . . . and Rowe, B. (2007). Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services. *Architectural Science Publications and Research.*, Paper 1.
- Ochoa de la Torre, J., & Serra Florensa, R. (1999). *La vegetacion como instrumento para el control microclimático*.
- Ochoa, J. M. (1999). *La vegetacion como instrumento para el control microclimatico*, Tesis Doctoral. Barcelona.
- Ochoa, L., Hendrickson, C., & Scott Matthews, H. (2002). Economic Input-output Life-cycle Assessment of U.S. Residential Buildings. *Journal of Infrastructure and Systems*, 132–138.
- Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol 108, n° 455, 1–24.
- Oke, T. (1988). Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings* 11, 103–113.
- Oke, T. E. (s.f.). “*Street Design and Urban Canopy Layer Climate*”.
- Oke, T. R. (1990). *Boundary layer climates*. London: 2<sup>a</sup> ed. Routledge, .
- Olcina-Santos, J. (1996). *El clima: factor de diferenciación espacial: divisiones regionales del mundo desde la antigüedad hasta el s. XVIII*.
- Olgyay, V., & Olgyay, A. (1992). *Design with climate*. Van Nostrand Reinhold.

- Onomura, S., Grimmond, C., Lindberg, F., Holmer, B., & Thorsson, S. (2015). Meteorological forcing data for urban outdoor thermal comfort models from a coupled convective boundary layer and surface energy balance scheme. *Urban Climate* (11), 1-23.
- Peck, S., C.Callaghan, Khun, M., & Brass, B. (1999). *Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada*. Toronto.
- Peng, L. L., & Jim, C. (2013). Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Therma Sensation. *Energies*, 598-618.
- Pol, S., & M.Brown. (2008). Flow Patterns at the Ends of a Street Canyon: Measurements from the Joint Urban 2003 Field Experiment. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY* 47.
- Porsche, U., & Köhler, M. (2003). Life cycle costs of green roofs: A comparison of Germany, USA and Brazil. *Proceedings of the World Climate and Energy Event 1-5 December 2003*. Rio de Janeiro, Brazil.
- RAE. (2014). *Diccionario de la Real Academia de la lengua Española, 23 edición*. Madrid.
- Rakovec, J., & Zaksek, K. (2012). On the proper analytical expression for the sky-view factor and the diffuse irradiation of a slope for an isotropic sky. *Renewable Energy*, 37(1), 440-444.
- Rich, S. (1970). Effects of Trees and Forests in Reducing Air Pollution". *Symposium on Trees and Forests in an Urbanizing Environment, Amherst, MA, Aug.18-21*. Massachusetts: University of Massachusetts.
- Robinson, D. (2011). *OCmputer Modelling for Sustainable Urban Design. Pgysical Principles, Methods and Applications*. Earthscan.
- Robinson, D., & Stone, A. (2004). Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy* 9, vol 77 n.3, 295-309.
- Robitu, M., Inard, C., Groleau, D., & Musy, M. (2004). Energy balance in water ponds and its influence over building energy consumption. *Building Services Engineering, research and technology* 25, 171-182.



- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., & Groleau, D. (2005). Modelling the influence of trees and water pond in urban microclimates. *Solar Energy*, 435-447.
- Ronda, R., Steeneveld, G., Hove, L. v., & Holtslag, A. (s.f.). *anthropogenic heat release and urban heat island effect in Netherlands*.
- Ross, J. I. (1975). Radiative transfer in plant communities. En J. Monteith, *Vegetation and the Atmosphere, Principles, vol. 1* (págs. 13–55). London: Academic Press.
- Saad, T. (s.f.). *Turbulence Modeling for Beginners*. Tennessee: University of Tennessee.
- Sabo, P. (2005). *Study and draft methodology of calculation of a new indicator*.
- Saiz, S., Kennedy, C., Bass, B., & Pressnail, K. (2006). Comparative life cycle assessment of standard and green roofs. *Environmental Science and Technology* N°40, 4312-4316.
- Sala, M. (1998). Advanced Bioclimatic Architecture for Buildings. *Renewable Energy. Vol 15*, 271-276.
- Salíngaros, N. A., & Pagliardini, P. (2010). Geometría y vida del espacio urbano. *Cuadernos de Arquitectura y Nuevo Urbanismo, numero 6-7- Tecnológico de Monterrey, Mexico*, 7-20.
- Sánchez de la Flor, S., & Alvarez Domínguez, F. (2004). Modelling Microclimate in Urban Environments and Assessing its Influence on the Performance of Surrounding Buildings. *Energy and Buildings. Vol 36*, 403-413.
- Santamouris, M. (2001). *Energy and climate in the urban built environment*. Athens: Santamouris M.
- Santamouris, M. (2001). Heat Island Effect. In M. Santamouris, *Energy and climate in the urban built environment* (pp. 48-69). London: James & James ( Science Publishers) Ltd.
- Santamouris, M. (2007). Heat Island Research in Europe: the State of the Art. *Advances in Building Energy Research, vol 1*, 123-150.
- Santamouris, M. (2012). Using Cool Paving Materials to Improve Microclimate in Urban Areas. Design-Realization and Results on the Flisvos Project. *Building and Environment, vol 53*, 128-136.

- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703.
- Santamouris, M., N., P., I., L., I., K., Georgakis, C., Argiriou, A., & Assimakopoulos, D. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Solar Energy* 70, 201–216.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I., & Assimakopoulos, D. (1999). Thermal and Air Flow Characteristics in a Deep Pedestrian Canyon and Hot Weather Conditions. *Atmospheric Environment Vol 33*, 4503-4521.
- Scholz-Barth, K. E. (August de 2004). *Green Roofs: Stormwater Management from the Top Down*. Obtenido de <http://www.edcmag.com/CDA/ArticleInformation>
- Simpson, J., & McPherson., E. (2000). “Effects of Urban Trees on Regional Energy Use and Avoided Carbon”. *American Meteorological Society*, 143-144.
- Spala, A., Bagiorgas, H. S., Assimakopoulos, M. N., Kalavrouziotis, J., Matthopoulos, D., & Mihalakakou, G. (. (2008). On the green roof system. Selection, state of the art and energy potential investigation of a system installed in an office building in Athens. *Renewable Energy* 33(1), 173-177.
- Spirn, A. W. (1986). *Air Quality at Street-Level: Strategies for Urban Design*. Boston.
- Stahgellini, C. (1987). *Transpiration of Greenhouse Crops. PhD. Dissertation*,. Wageningen: Agricultural University.
- Stephen R. Hardwick, R. T. (2014). The relationship between leaf area index and microclimate in tropical forest and oil palm plantation: Forest disturbance drives changes in microclimate. *Agricultural and Forest meteorology*, 187-196.
- Stryjenski, J. (1968). *L'acoustique appliquée à l'urbanisme*. . Ginebra: Les editions techniques.
- Susca, T. G. (2011). Positive effects of vegetation: Urban heat island and green roofs. *Environmental Pollution*, 159(8), 2119-2126.

- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration and anthropogenic heat. *Energy and building* No. 25,, p.99-103.
- Taha, H. H. (2002). *Meteorological and air quality impacts of increased urban albedo and vegetative cover in the Greater Toronto Area, Canada*. Lawrence Berkeley National Laboratory. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Taha., H., Akbari, H., Sailor, D., & D. R. Ritschard. (1992). *Causes and effects of heat island. Sensitivity to surface parameters and anthropogenic heating*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley Lab. Rep. 29864.
- Theodosiou, T. G. (2003). Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. *Energy and Buildings*, 35(9),, 909-917.
- Thornthwaite, C. W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review* 38 , 55–94.
- Torre, O. d. (1999). *La vegetacion como instrumento para el control microclimatico*. Barcelona.
- Turmini, I. (2012). *El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid*. Madrid.
- UE, P. E. (2002). *irectiva 2002/91/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 16 de diciembre de 2002, relativa a la eficiencia energética de los edificios*.
- Ulrich, R. (198). Human responses to vegetation and landscapes. *Landscape and Urban Planning*, 24-26.
- Ulrich, R. (1984). View from a Window May Influence Recovery from Surgery. *Science*, vol 224., 420-421.
- USGBC. (2009). *Leadership in Enery and Environmental Design*. Washington D.C.: USGBC.
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., & R. T., & X. (2005). Green roof stormwater retention. *Journal of environmental quality*, 34(3),, 1036-1044.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E., Pericleous, K., & Gonzalez-Flesca, N. (2003). Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment* 37, 155–182.

- Vinet, J., Raymond, F., & Inard, C. (2000). A simulation tool to assess the impact of vegetation on the urban. *Proceedings of IBPC 2000 International Building Physics Conference*, , (págs. 637–644). Eindhoven (NL).
- Volder, A., & Dvorak, B. (2014). Event size, substrate water content and vegetation affect storm water retention efficiency of an un-irrigated extensive green roof system in Central Texas. *Sustainable Cities and Society vol 10*, 59-64.
- Wackernagel, M. (2004). *National Footprint and Biocapacity Accounts: The underlying calculation method*.
- Watson, I. D., & Johnson, G. T. (1987). Graphical estimation of sky view-factors in urban environments. *Journal of Climatology* 7 (2):, 193–197.
- Weiss, M., Frederic, B., Smith, G., Jonckheere, I., & P., C. (2004). Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and forest meteorology* 121(1) *GRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY* 121(1):37-53 · JANUARY 2004, 37-53.
- White, M. P., Alcock, I., Wheeler, B. W., & Depledge, M. H. (2013). Would You Be Happier Living in a Greener Urban Area? A Fixed-Effects Analysis of Panel Data. *Psychological Science; vol 24*, 920-928.
- Wong, N., Cheong, D., Yan, H., Soh, J., Ong, C., & Sia, A. (2002). . The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. *Energy and Buildings. Vol 35*, 353-364.
- Yamartino, R., & Wiegand, G. (1986). Development and evaluation of simple models for the flow, turbulence and pollution concentration fields within an urban. *Atmospheric Environment* 20, 2137-2156.
- Yang, J., Yub, Q., & Gongc, P. (2008). Quantifying air pollution removal by green roofs in Chicago. *Atmospheric, Environment. Volume 42, Issue 31*, 7266–7273.
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., & Meng, Q. (2013). An in-depth assessment and verification of ENVI-met 4 Preview microclimate data. Comparison with field data from Guangzhou, South China. *Building and Environment* 60 , p.93-104.

- Yang, X., Zhaoa, L., Bruse, M., & Meng, Q. (2012). An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments. *Energy and Buildings* 54, p.243-251.
- Yeang, K. (1999). *El Rascacielos Ecológico*. Barcelona: Gustavo Gili.
- Yeang, K. (1999). *El Rascacielos Ecológico*. Gustavo Gili.
- Yoshino, M. (1975). *Climate in a small area*. Tokyo University Press.
- Zeihner, L. (1996). “*The ecology of Architecture. A Complete Guide to Creating the Environmentally Conscious Building*”. New York.

