

GRADO EN INGENIERIA DE TECNOLOGIA DE
MINAS Y ENERGIA

TRABAJO FIN DE GRADO

***ESTUDIO TECNICO. DISEÑO DE UNA
FACHADA VEGETAL EN LA ESCUELA
DE INGENIERÍA DE MINAS Y OBRAS
PÚBLICAS***

Alumno/Alumna: Zubiri, Moro, Erik Alexander

Director/Directora (1): Azkorra, Larrinaga, Zalao

Curso: 2017-2018

Fecha: Bilbao a 16 de junio de 2018

INDICE

<u>1.MEMORIA</u>	4
1.1 RESUMEN.....	4
1.2 INTRODUCCION.....	5
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	7
1.3.1 ¿QUE ES LA FACHADA VERTICAL?	7
1.3.2 TIPOS DE FACHADAS VERTICALES.....	7
1.3.3 BENEFICIOS DE LAS FACHADAS VEGETALES.....	8
1.3.4 TIPOS DE PLANTAS PARA FACHADAS VEGETALES.....	22
<u>2.METODOLOGIA</u>	26
2.1 CELULA PASSLINK.....	26
2.1.1 INTRODUCCION.....	26
2.1.2 ESCENARIO DE LA EXPERIMENTACION.....	26
2.1.3 DESCRIPCION CELULA DE ENSAYO PASSLINK.....	27
2.1.4 COMPOSICION PASSLINK.....	28
2.2 EQUIPOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA INTERIOR.....	35
2.3 INSTRUMENTACION DE LA FACHADA VEGETAL.....	38
<u>3.CALCULOS</u>	42
3.1 EFICIENCIA DE LAS CUBIERTAS VEGETALES.....	42
3.2 TEMPERATURA MAXIMA, T SOL-AIR.....	43
3.3 TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.....	45
3.4 EVALUACION DE LA EFICIENCIA.....	46
3.4.1 INVIERNO.....	47
3.4.2 VERANO HUMEDO.....	56
3.4.3 VERANO SECO.....	65

4.CONCLUSIONES.....74

5.BIBLIOGRAFIA.....76

1. MEMORIA

1.1 RESUMEN

El proyecto consiste en el estudio energético de una fachada vegetal en la Escuela Universitaria de Ingeniería de Minas y Obras Públicas (EUITIMOP).

En primer lugar se describe la situación actual del sector energético y se define la fachada vegetal. Antes de dar comienzo al análisis sobre el comportamiento también se demuestran los beneficios de las fachadas verdes en diferentes ámbitos frente a los convencionales.

En segundo lugar, se estudia el comportamiento térmico de la fachada vegetal basándose en la información suministrada por el Laboratorio de Control de Calidad (LCCE), en Vitoria-Gasteiz. En este apartado se explica el experimento realizado en la célula PASSLINK y los elementos por los que está compuesto y también la instrumentación necesaria para la obtención de datos.

Por último, después de obtener todos los datos, se realizan los cálculos de eficiencia dados en el modulo de la fachada verde, y se calcula la eficiencia energética producida para diferentes casos a estudiar. Los resultados son la base para llegar a las conclusiones del proyecto y se quiere demostrar el futuro de lo que supone la instalación de la fachada vegetal en la Escuela de Ingenieros.

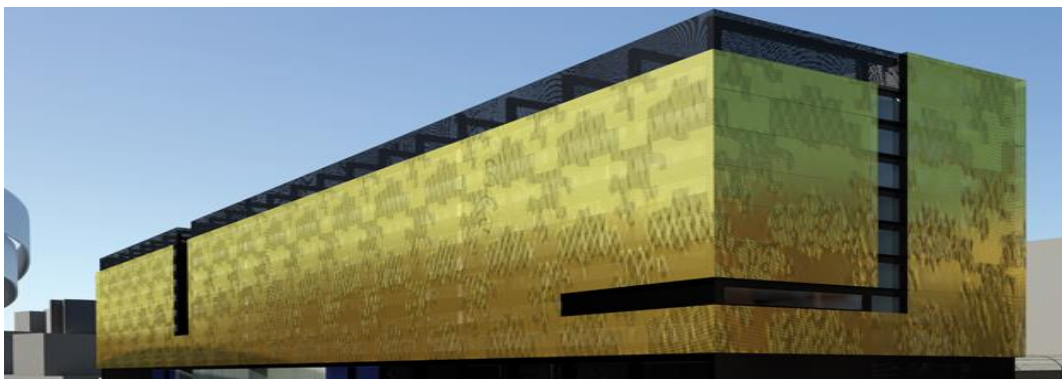


Fig.1.1 Escuela Universitaria de Ingeniería de Minas y Obras Públicas.

1.2 INTRODUCCION

El crecimiento económico y social, el avance y desarrollo de la industria, la tecnología y la evolución de los estilos de vida de la población, hacen indispensable la planificación estratégica del sector energético, con el objetivo de garantizar el abastecimiento de energía que permita satisfacer la demanda de las presentes y futuras generaciones.

Uno de los sectores donde más energía se consume es la edificación. Los edificios son responsables de más del 40 % del total de energía consumidos [1], y por lo tanto, de la contaminación que este consumo genera. Por ello la Plataforma de Edificación Passivhaus (PEP) promueve el compromiso tanto de la asociación como de los alcaldes, mandatorios y otros miembros institucionales, por conseguir que antes del 31 de diciembre de 2018, para edificios ocupados o propiedad de autoridades públicas, y del 31 de diciembre de 2020, para los privados, sean edificios de consumo casi nulo.

Muchos de los investigadores, arquitectos, incluso los propios habitantes de los edificios se involucran en la búsqueda de alternativas sostenibles para conseguir reducir el consumo de energía de los edificios. El 55% del consumo de los edificios se utilizan para climatización, es decir, calefacción en invierno o refrigeración en verano [2] . La reducción del consumo supone entonces, un mayor uso de energía procedente de fuentes renovables y una importante seguridad en el abastecimiento energético y el desarrollo tecnológico y ofrecer oportunidades de empleo [3].

La reducción del consumo es bastante compleja, puesto que frente a dicha reducción derivan otros problemas de difícil gestión como el cambio climático, la pérdida de biodiversidad y degradación del suelo. Para ello se presenta la fachada vegetal como unas de las posibles alternativas.

En la mayoría de las zonas urbanas existen espacios en los que se han integrado árboles, plantas y otros elementos vegetales, tales como plazas ajardinadas, paseos y avenidas arboladas, jardines botánicos etc. En el modelo de ciudad tradicional estos elementos quedan confinados a determinados espacios delimitados, existiendo una clara diferencia entre los edificios de ladrillo, piedra y/o hormigón y espacios vegetales de aspecto verde y vivo. Sin embargo, la fachada vegetal cambia el tradicional aspecto por otro verde y vivo integrando los elementos vegetales a los propios edificios. La fachada vegetal representa un concepto semejante al de las azoteas ajardinadas solo que adaptadas a los

muros verticales y son consistentes en disponer una capa base (ya sea sustrato, fieltro, celosía, modulo, cable...) sobre un muro para permitir el desarrollo de las plantas.

En el siglo XXI las ciudades se deben diseñar de una perspectiva ecológica y aunque los jardines verticales no se puedan explotar como espacio de uso, estos proporcionan un aumento muy relevante de la biomasa vegetal y ayudan así a la disminución del calentamiento global. Por lo tanto, disminuimos el impacto ambiental de las edificaciones y aumentamos el de las personas que viven o trabajan donde están instalados.

1.3 ESTADO DEL ARTE

1.3.1 ¿QUE ES LA FACHADA VEGETAL?

La construcción de una fachada vegetal vertical es una de las composiciones más complejas de llevar a cabo en el ámbito de la jardinería y el paisajismo, puesto que su objetivo es emular las características de un jardín tradicional pero en perpendicular, razón por la que también recibe el nombre de jardín vertical.

Existen diversos sistemas para su construcción, así como diversos métodos basados en paneles modulares, en geomallas e incluso en macetas superpuestas. Sin embargo, ninguno de estos sistemas garantiza la supervivencia de las plantas seleccionadas para nuestro muro vegetal. Uno de los principales retos que supone el diseño y la construcción de una fachada verde vegetal es el hecho de que las plantas y la vegetación carecen de suelo en el que enraizar, por lo que será necesaria la utilización de láminas de diversos materiales para que puedan asentarse y recibir el suministro necesario de agua y nutrientes.

1.3.2 TIPOS DE FACHADAS VERTICALES

Como ya se ha mencionado anteriormente existen diversos sistemas verticales vegetales. Entre ellos cabe diferenciar dos grandes grupos: las paredes o fachadas vivas de paneles modulares o geotextiles anclados al muro de fachada y el resto de fachadas vegetales que utilizan sistemas de malla, cableado o enrejado como soporte.

1.3.2.1 Fachadas vegetales tradicionales

En este tipo de fachadas las plantas (enredaderas o arbustos) se desarrollan de forma dirigida con la ayuda de la misma fachada. El lugar donde se colocan las plantas es en el suelo, ya que son estas las que se van desarrollando hasta tapizar el muro de la vivienda.

1.3.2.2 Fachadas vegetales de doble piel o cortina vegetal

El objetivo de estas fachadas es crear una doble piel o cortina vegetal separada de la pared de la fachada. La separación con el muro de fachada de la vivienda se puede conseguir utilizando los diferentes sistemas de apoyo: enrejados modulares, entramados metálicos, paneles rígidos, sistema de cable o mallas.

1.3.2.3 Jardineras perimetrales

Este tipo de fachada vegetal es de los más sencillos. Las macetas, jardineras o contenedores tienen un gran abanico respecto a su colocación y por ello no es necesario elaborar sofisticados sistemas de riego.

1.3.2.4 Paredes vivas

Forman parte del sistema envolvente del edificio. Se componen de paneles o módulos verticales, o fieltros a base de geotextiles fijados verticalmente a un marco estructural, a su vez fijado a una pared, fachada, muro o estructura. Los paneles pueden ser de plástico, poli estireno expandido, tejido sintético, arcilla, metal u hormigón y el apoyo puede estar compuesto de una gran diversidad de especies de plantas. El soporte de las plantas y el medio de cultivo se consiguen a partir de los módulos como de los fieltros.

1.3.3 BENEFICIOS DE LAS FACHADAS VEGETALES

1.3.3.1 Aislamiento y regulación térmica de los edificios

La envolvente exterior del edificio tiene como objetivo separar el ambiente interior del exterior y por ello es crucial para evitar la pérdida de calor o el sobrecalentamiento de las superficies.

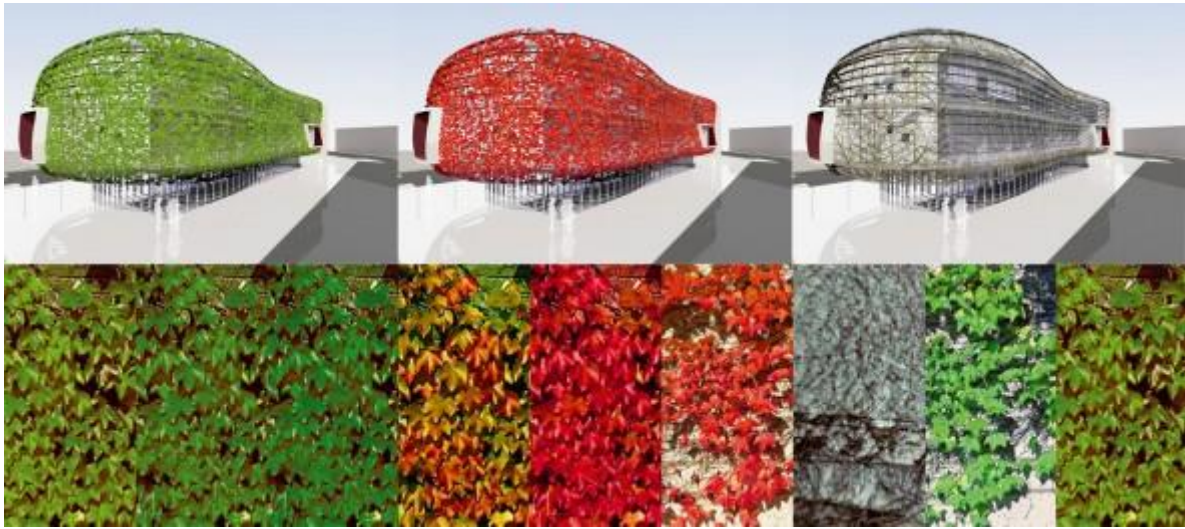


Fig.1.2 Representación gráfica de una fachada vegetal a lo largo de las estaciones del año desde invierno al otoño. Fuente: Ayuntamiento de Noain, Pamplona.

La fachada vegetal proporciona una capa protectora la cual protege la vivienda de la radiación solar. Por lo tanto, las tensiones térmicas del edificio se ven reducidas, lo que ayuda a refrigerar los edificios en verano y aislarlos en invierno. Las superficies de los edificios también pueden ser sombreadas por otros materiales constructivos pero frente a ellos esta la gran ventaja del uso de la vegetación. Los procesos metabólicos y biológicos que llevan a cabo las plantas (fotosíntesis y evapotranspiración) son la causa de la ventaja respecto a los otros elementos constructivos y varían conforme al tipo de vegetación, tamaño y densidad de las hojas y la estación del año.

La fotosíntesis es un proceso que transforma la energía de la luz del sol (radiación) en energía química. Consiste, básicamente, en la elaboración de azúcares a partir del CO₂ (dióxido de carbono) minerales y agua con la ayuda de la luz solar [4].

La compleja serie de reacciones que implica la fotosíntesis ocurre en dos etapas en los cloroplastos de las plantas. En primer lugar, ocurre el proceso dependiente de la radiación (reacción fotoquímica), este requiere energía radiante directa que excita la clorofila de las hojas (portador de energía) proceso en el cual se consume agua y CO₂ y se libera oxígeno, estas moléculas se utilizan en el segundo proceso, el proceso independiente de luz (etapa de oscuridad-proceso Calvin). Durante la segunda etapa las moléculas de carbono/hidrógeno intermedio se consumen y se generan carbohidratos.

Esto indica que la fotosíntesis puede convertir la energía solar en energía química. El proceso global de la fotosíntesis puede ser representada por la siguiente ecuación [5]:

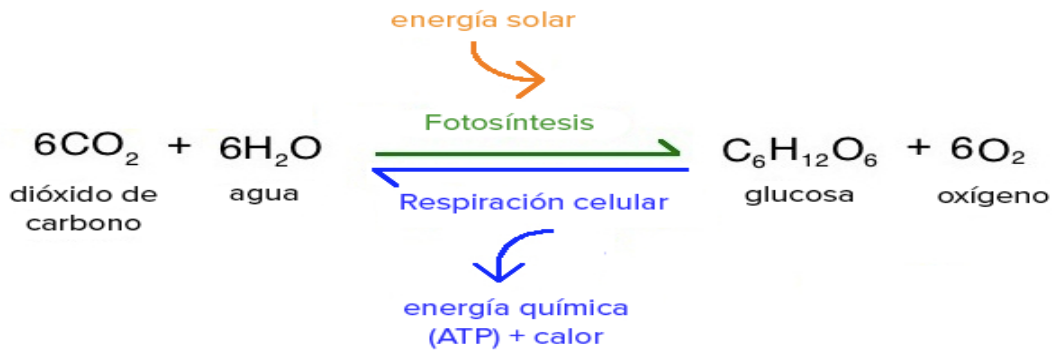


Fig. 1.3 Esquema del proceso global de la fotosíntesis. Fuente: Academia khan.

La evaporación es el proceso por el cual el agua pasa de fase líquida a fase de vapor, desde la superficie a la atmósfera. El agua puede evaporarse desde una gran variedad de superficies tales como suelos, lagos, ríos, y vegetación húmeda. Este cambio de fase requiere un aporte de energía, proporcionado fundamentalmente por la radiación solar y, en menor grado, por el aire que circunda la superficie evaporante.

La transpiración consiste en la vaporización de agua líquida contenida en los tejidos de la planta y en el transporte del vapor de agua a la atmósfera. Los cultivos pierden agua predominantemente a través de los estomas y, en menor medida, a través de la cutícula. Los estomas son pequeñas aberturas en las hojas a través de las cuales circulan el vapor de agua y otros gases como el CO_2 y el O_2 . Es de resaltar que casi toda el agua absorbida por la planta es transferida a la atmósfera mediante este proceso, manteniéndose en su interior sólo una fracción mínima. La transpiración depende, al igual que la evaporación, del suministro de energía para el cambio de fase, junto con el gradiente de presión de vapor entre el aire húmedo saturado del espacio intercelular y la atmósfera circundante, que es la fuerza impulsora para el transporte de vapor a través de los estomas. Influye además la interacción del viento con la superficie, para el transporte del aire húmedo de la cubierta a la atmósfera libre.

Por ello, en función de las condiciones ambientales de temperatura, humedad, y radiación solar, el mecanismo de enfriamiento biológico será mayor o menor, lo cual afecta directamente a la refrigeración de los edificios.

El 50% energía solar es absorbida y el 30% es reflejada por las hojas y sólo alrededor del 20% de la radiación es capaz de penetrar en la superficie de las fachadas. Esto implica que una fachada cubierta por vegetación es capaz de evacuar el 80% de la energía incidente sobre él, mientras que una fachada tradicional recibirá el 100% de la exposición solar.

Considerando que el aire entre las hojas se mantiene a una temperatura relativamente baja y que la capa de vegetación sombrea la superficie, se consigue que la parte superior del sustrato se mantenga a una temperatura más baja que la temperatura ambiente. Si a esto se le suma la elevada capacidad térmica del sustrato, sobre todo cuando el contenido de humedad es alto. Se obtiene como resultado un gran potencial de las envolventes vegetales de disminuir la temperatura de la capa exterior de los cerramientos. Este sistema de enfriamiento funciona durante las temporadas cálidas del año.

En las temporadas frías, la evapotranspiración es limitada y la sombra no resulta ser el factor más relevante. Por otro lado, la respiración de las raíces evita el congelamiento de las mismas y mantiene el sustrato en contacto con ellas a una temperatura más elevada que la temperatura ambiente.

A pesar de que el aumento de la resistencia térmica sea limitado, la estabilidad térmica y la ausencia de picos bajos de temperatura se reflejan, en mayor o menor medida, en un descenso de las pérdidas térmicas dependiendo del tipo de sustrato utilizado[6].

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

1.3.3.2 Aislamiento acústico y absorción o reducción de ruido

El ruido producido por el tráfico y la contaminación acústica son problemas a los que un edificio tiene que responder con las debidas características constructivas. Las fachadas vegetales tienen efecto de amortiguación y absorción del ruido, actuando como pantallas acústicas y aislando los edificios acústicamente [7].

Normalmente las pantallas acústicas están echas de hormigon o tierra y como dato relevante destacar que un 20% de la población de la Union Europea [8] esta sometida a niveles de ruido por encima de lo aceptable para la salud. Una cubierta vegetal puede reducir el sonido en mas de 8dB en el interior del edificio, por lo tanto, la fachada vegetal actuaría de manera similar siendo claramente una mejora respecto a las pantallas acústicas empleadas hoy en dia.

La vegetación, gracias a su capacidad de absorción de ondas sonoras, ayuda a atenuar bajas y altas frecuencias, convirtiendo el sonido en energía. Asimismo, los componentes de las plantas, hojas, ramas y troncos, son capaces de reflejar y difractar el sonido lo que conlleva a un mejor ambiente y confort acústico en las áreas urbanas [9].

1.3.3.3 Aumento de la biomasa de la ciudad

Actualmente, el desarrollo de las ciudades, el incremento de las urbes, han reducido drásticamente el ecosistema natural alterando el equilibrio dinamico que formaban las especies de las plantas y animales. El ecosistema urbano ha generado una gran presión sobre el resto de ecosistemas para poder garantizar el funcionamiento de este [10].

Se espera que para el 2030 se duplique la proporción que representan las paredes respecto a la superficie de suelo urbano total [11]. En Inglaterra este porcentaje es del 10%, mientras que en America es aproximadamente del 50%. Por lo tanto, la vegetación vertical³ puede tener un papel muy importante y ser esta la opción para progresar en el aumento de la biomasa en las ciudades puesto que todas las fachadas estarían formadas por un paisaje vivo y verde como es el de las plantas.

La vegetación asociada a los edificios sirve como refugio a muchas especies animales [12,13], tanto de forma permanente o como paso entre las grandes zonas verdes (parques y jardines), lo que mejora la biodiversidad urbana. Por ello, las fachadas

vegetales ayudarían a ver las construcciones como grandes aliados incrementando los espacios verdes para hábitat y refugio de las plantas. La vegetación vertical se puede considerar como una representación de los hábitats naturales verticales tales como los acantilados cubiertos de plantas trepadoras o cascadas con vegetación, lo que crea hábitats para los organismos.

La vegetación de las fachadas vegetales restablece la vida y el ciclo ecológico y aporta biomasa vegetal, la cual sirve de refugio para insectos en las zonas urbanas, mejorando la biodiversidad cualitativamente y cuantitativamente [14]. También destacar que, mediante los espacios verdes urbanos y periurbanos se demuestra la mejoría en el bienestar de las personas.

1.3.3.4 Mejora visual del edificio

El crecimiento de la ecología urbana y el desarrollo urbano sostenible son culpables de un gran debate sobre las consecuencias ambientales negativas que estos conllevan. Para ello, varios países afrontan la forma de lograr soluciones respetuosas con el medio ambiente. Países como Reino Unido con la estructura de ``ciudad compacta'', y Dinamarca ``ciudad verde'' [15,16] son un ejemplo a seguir del desarrollo urbano sostenible así como, los 3.000 municipios alemanes que financiarán la construcción de fachadas vegetales con un incentivo de 25 marcos por metro cuadrado como mínimo, hasta 100 marcos para el caso de Berlín.

Lo más destacable a simple vista es la mejora visual de las ciudades, sobretodo de las paredes medianeras y fachadas posteriores de edificios que son grises, antiestéticas y deslucidas normalmente. La fachada vegetal hace del espacio público un lugar más agradable paisajísticamente y además mejora la calidad de vida humana [17].



Fig.1. 4 Efecto del verde sobre el gris en la sede de Pasona, Tokio.

Esta información se contrasta en un estudio que se realizó por White y Gatersleben (2011) [18]. Comprobaron en cual de las viviendas preferirían vivir los ciudadanos, en casas con vegetación o sin ella. Los resultados demostraron que las casas en las que predominaba la vegetación fueron significativamente más seleccionadas (la fachada de hiedra y cubierta ajardinada) debido a que eran más agradables y tenían una calidad afectiva positiva. Este estudio demuestra que la vegetación integrada en los edificios es un complemento valioso y por ello son culpables del aumento de valor de los edificios entre un 6% y un 15% [19].

Por lo que, las actuales estructuras de hormigón, las calles con fachadas grises, los edificios públicos o grandes edificios comerciales, pueden ser una oportunidad para introducir fachadas vegetales.

1.3.3.5 Beneficios para la salud

El encontrarse en un entorno natural (zonas ajardinadas, flores, árboles etc.) ha demostrado que produce bienestar en los pacientes de hospitales. Este fenómeno es conocido como biophily otras formas de vida actuando positivamente sobre las distintas especies [20]. La presencia de un entorno verde produce efectos psicológicos muy positivos, por ejemplo, el Gobierno de Australia recomienda la utilización de cerramientos verdes los cuales tienen como consecuencia el menor [21].

Está demostrado el efecto psicológico de tranquilidad y relajación que provoca el color verde sobre las personas. Un paseo por un espacio verde de la ciudad, por ejemplo, ayuda a bajar la presión arterial y reduce el ritmo cardíaco. También se ha comprobado que la presencia de verde contribuye a una más rápida superación de los síntomas del estrés y cardiacos y mejora la estancia y la recuperación de los pacientes en los hospitales [22].



Fig. 1.5 Garden of Dreams y Friendship Garden, en el Hospital infantil de, San Diego, California.

Los estudios de mercado demuestran que las personas dan un elevado valor al espacio verde y ajardinado, ya que cuando existen espacios verdes o jardines, los promotores y propietarios de edificios son capaces de atraer compradores de una forma más sencilla.

1.3.3.6 Reducción del efecto isla de calor urbano

La mitad de la población mundial vive en áreas urbanas y se prevee que para el año 2030 este porcentaje pase a ser del 60%. El hecho de que cada vez viva más gente en las áreas urbanas produce un aumento de temperatura en estas, el aumento de superficies impermeables y todo ello conlleva al calentamiento global [23,24].

Por esta causa, un elevado número de científicos están intentando buscar soluciones a la diferencia de temperatura que se produce entre el espacio urbano y sus alrededores (efecto de isla de calor urbano), que puede llegar hasta una diferencia de 10°C en verano [23,25].

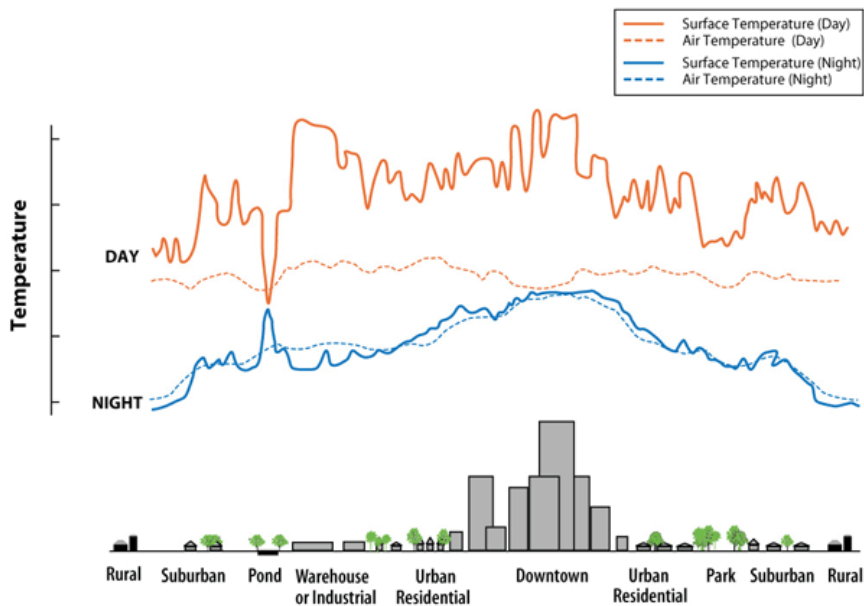


Fig. 1.6 Gráfica de la variación de las temperaturas superficiales y atmosféricas sobre diferentes áreas de uso de la tierra.

La reducción de temperatura en las áreas urbanas es un camino para la reducción del efecto de isla de calor. Para ello recordar que las plantas pierden agua hacia el medio ambiente mediante la evotranspiración produciendo así una absorción de la temperatura del ambiente y aumentando la humedad en ella [26]. De tal forma, las plantas son capaces de disminuir el efecto de isla de calor de las ciudades y por ello la vegetación es considerada una de las medidas más eficaces para la mejora del microclima urbano.

Las fachadas vegetales tienen una temperatura superficial más fría que las convencionales y con lo cual emiten menos calor de radiación, disminuyendo de esta otra manera la temperatura del ambiente. En varios estudios se demuestra que utilizando estos elementos constructivos se reduce la temperatura del aire que rodea las superficies entre 2 y 5°C de promedio en verano [26,27].

Mediante fachadas vegetales se puede reducir hasta 8.4 °C la temperatura de las ciudades durante el día. Cuanto más caliente y seco sea el clima mayor es el efecto de la vegetación sobre la reducción de temperatura urbana, pudiendo llegar a ahorrar energía para la refrigeración de los edificios entre un 32 y 100 % [28].

El efecto sobre la temperatura del aire de los muros vegetales depende de las características del muro, tipo de vegetación, sustrato, etc. Los muros sin sustrato no presentan una reducción significativa de la temperatura del aire que los rodea, mientras que los muros con sustrato inorgánico son muy efectivos. La reducción de la temperatura del aire se percibe hasta 0.60 m de distancia del muro.

1.3.3.7 Protección contra inundaciones

Las fachadas vegetales tienen una gran capacidad para reducir considerablemente el vertido de agua en el alcantarillado. Esto se debe a que las plantas acumulan agua en el sustrato y es evaporado a la atmósfera, reduciendo el caudal de agua que proviene del alcantarillado y disminuyendo el riesgo de que se produzcan inundaciones.

En este caso, las fachadas vegetales son menos eficaces que las cubiertas puesto que la lluvia generalmente se acumula en la parte superior de los edificios. La capacidad de retención de agua de las cubiertas de techo verde intensivo es del 75% y de un 45% en techos verdes extensivos. Por lo tanto, aun siendo menos eficaces (debido a la posición) se demuestra que las fachadas verdes ayudarían en la reducción de acumulaciones de agua [29,30].

1.3.3.8 Protección frente a la radiación solar. Sombra

El sol es una fuente de radiación directa sobre las ciudades. Las envolventes verdes son capaces de reducir dicha radiación. Los elementos de las fachadas vegetales pueden actuar como protección ante el calor producido por los rayos del sol, ya que la vegetación obstruye, filtra y refleja la radiación solar, pudiendo llegar a evitar del 50 al 90% de la radiación producida por el sol.

En caso de que las capas de vegetación se superpongan, incluso se podría evitar por completo la radiación solar. Cabe destacar que la capacidad de absorción depende del color de la hoja, sin embargo, a diferencia de las fachadas convencionales, las hojas no calientan la superficie sino que la planta utiliza dicha energía en la producción de biomasa o autoregulación térmica mediante la evapotranspiración [31].

1.3.3.9 Mejora de la calidad del aire

Sumidero de contaminantes

Uno de los mayores peligros para la salud son las partículas suspendidas en el aire, es decir, cuando se dice que el aire está contaminado. Pueden producir problemas cardíacos o respiratorios y especialmente a las partículas con un diámetro inferior a 10 micras. En las áreas urbanas el 80% de las partículas suspendidas en el aire provienen del tráfico. Dependiendo del diámetro se denominan PM10 (10 micrometros) o PM2.5 (2.5 micrometros). Las más estándares en la contaminación del aire son las inferiores a 10 micras y las más peligrosas son las más pequeñas porque penetran en el sistema respiratorio [32].

En este caso, el sustrato de la vegetación de la fachada actúa como depósito de estas partículas y las aprovecha o las metaboliza por la microflora del suelo (hongos y bacterias). Contaminantes como el plomo, cadmio u otros metales pesados se fijan en los tejidos vegetales y de no ser por estos permanecerían en suspensión en el aire.

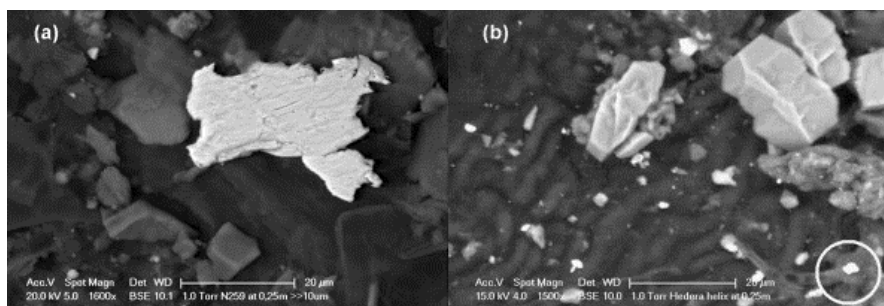


Fig. 1.7 Microfotografía de partículas de acero inoxidable (a) y varias partículas de materia (b).

El fenómeno de la lluvia hace que las partículas contaminantes fluyan sobre las hojas hasta que se concentran en la punta. Esta acumulación hace que los contaminantes muy difícilmente puedan de nuevo suspenderse en el aire y por ello se dice que la vegetación ayuda a sedimentar las sustancias contaminantes. Para que los efectos positivos que pueden aportar los jardines vegetales sobre la calidad del aire de las ciudades sean perceptibles, se requieren políticas urbanas específicas que fomenten la aplicación generalizada de fachadas y cubiertas verdes.

Sumidero de CO₂

Los procesos de combustión son una de las razones por las que se producen cantidades elevadas de CO₂. El dióxido de carbono junto con el vapor de agua y gases varios, son los culpables de la destrucción de la atmosfera y por ello es muy importante la disminución de estos. La aportación de las fachadas vegetales es imprescindible puesto que contribuyen directamente en la atenuación del cambio climático transformando el CO₂ en O₂ (en las urbes se ve reducido el O₂ en un 17-18%) [33].

Otro aspecto a tener en cuenta durante el proceso metabólico de la fotosíntesis es la captura y transformación del dióxido de carbono (CO₂) en carbono (C) y su almacenamiento como biomasa reduciendo así los niveles de CO₂ atmosféricos.

1.3.3.10 Mejora de la calidad del aire interior

Los espacios cerrados de los edificios convencionales, están contruidos con materiales artificiales que por su deterioro y calidad pueden generar contaminantes. La agencia de protección ambiental afirma que mas de 300 contaminantes son inhalados diariamente.

Por esta razón, la calidad de aire que se respira dentro de estos espacios interiores puede afectar a la salud de sus habitantes. La organización mundial de la salud (OMS) cifra en 2 millones anuales el numero de fallecimientos en el mundo derivados del aire interior [34].

Tabla 1. Contaminantes y sus fuentes más comunes Fuente: Organización mundial de la salud (2014)

Situación	Fuentes de emisión	Contaminantes
Exterior	Producción industrial	SO ₂ , NO ₂ , NO, ozono, partículas, CO
	Vehículos de motor	COV
	Suelo	CO, NO ₂ , NO, plomo Radón
Interior	<i>Materiales de construcción</i>	
	Piedra, hormigón	Radón
	Compuestos de madera	Formaldehído, COV
	Aislamiento	Formaldehído, fibra de vidrio
	Ignífugos	Asbesto
	Pintura	COV, plomo
	<i>Instalaciones y mobiliario</i>	
	Calefacción, cocinas	CO, CO ₂ , NO ₂ , NO, COV, partículas
	Fotocopiadoras	Ozono
	Sistemas de ventilación	Microorganismos
	Actividad metabólica	CO ₂ , vapor de agua
	Actividad biológica	Microorganismos
	Actividad humana	
	Tabaquismo	CO, Partículas...
	Ambientadores	Fluorocarburos, olores
Limpieza	COV, olores	
Ocio, actividades artísticas	COV, olores	

La fachada vegetal, gracias a algunas especies de plantas utilizadas para su construcción, son capaces de absorber y eliminar los contaminantes interiores del edificio. En la siguiente tabla se muestran las plantas que absorben los distintos contaminantes:

Tabla 2. Plantas tropicales adecuadas para fachadas vegetales que mejor eliminan las sustancias contaminantes.

Plantas	
Sustancias Contaminantes	
Formaldehído (CH ₂ O)	Lirio de la paz (<i>Spathiphyllum sp.</i>) Helecho de Boston (<i>Nephrolepis exaltata</i> “ <i>Bostoniensis</i> ”) Hiedra inglesa (<i>Hedera hélix</i>)
Monóxido de carbono(CO)	Plata de araña (<i>Chlorophytum comosum</i>) <i>Dracaena</i> “ <i>Janet Craig</i> ” <i>Ficus sp</i>
Compuestos orgánicos volátiles	Poto de oro (<i>Scindapsus aureus</i>) Hiedra del diablo (<i>Aureun epipemnum</i>) Filodendro (<i>Philodendrum sp</i>)
Tricloroetileno (TCE)	Lengua de suegra (<i>Sansevieria trifasciata</i> “ <i>Laurentii</i> ”) Crisantemo (<i>morfolium Chrysantemum</i>)
Benceno (C ₆ H ₆) Tolueno (C ₇ H ₈). Xileno (C ₆ H ₁₀)	Helecho Kymberly Quenn (<i>Nephrolepsis obliterata</i>) Orquidea sp (<i>Phalepnosis sp</i>) <i>Dieffenbachia sp</i>

1.3.4 TIPOS DE PLANTS PARA FACHADAS VEGETALES

La selección de las plantas para las fachadas vegetales, están influenciadas por el modo o la característica de la planta trepadora en cuestión. La mayor parte de las plantas trepadoras se adjuntan a las fachadas de uno o de dos modos:

Autoadherente: Son plantas que se adhieren o que contienen raíces adventicias. Estas plantas forman una capa de vegetación sobre la pared del edificio o superficie.



Fig. 1.8 Plantas self clingin autoadherente

Entrelazandose o a través de zarcillos: Son plantas que contienen tallos trepadores o que son enganchadas mediante zarcillos. Estas plantas trepadoras requieren un sistema de apoyo especializado y pueden trepar tanto hacia arriba como cayendo a torrentes.



Fig. 1.9 Algunas plantas se adhieren a las estructuras entrelazandose o enganchandose mediante zarcillos.

Las trepadoras que se pegan a las paredes por si mismas pueden proporcionar una fachada eficaz y a largo plazo, pero no pueden emplearse en fachadas con estructuras pobres debido a las tensiones que estas producen. Una de las trepadoras mas comunes es la Hiedra Común y siempre será necesaria la poda para mantener el crecimiento de la planta, la forma y el tamaño deseado.

Las trepadoras requieren un sistema de apoyo, como el cable o enrejado para apoyar su hábito de crecimiento. Estos apoyos pueden estar conectados con el edificio o montados por separado y por ello, la selección de la planta tiene que considerar el espacio disponible para el crecimiento de esta, de manera que el funcionamiento de la planta sea el adecuado.

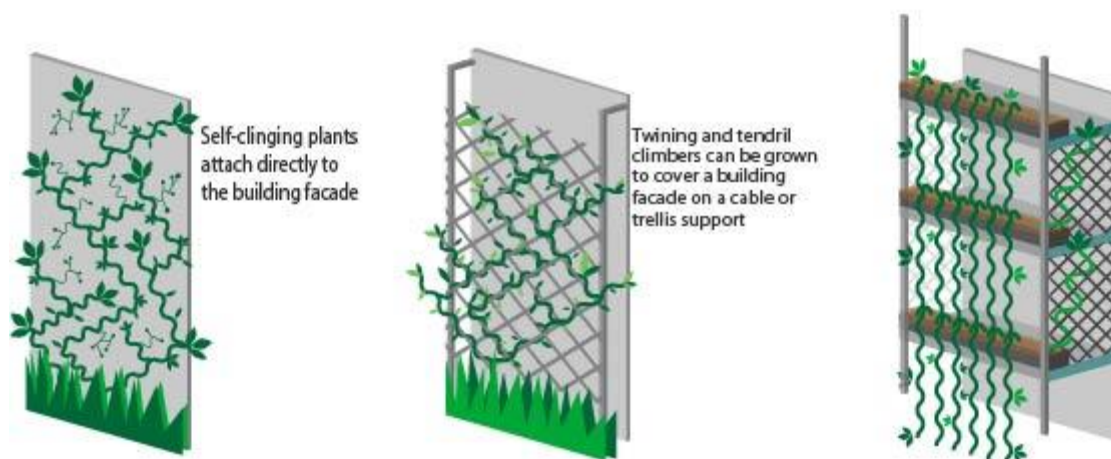


Fig. 1.10 Esquema de funcionamiento de las distintas plantas estudiadas.

Factores climáticos.

Un factor muy importante es la luz que proviene del sol. En las ciudades, muchos de los edificios estan rodeados de otros y la luz no les alcanza, lo cual significa que se mantendrán en la sombra la mayoría de días del año. En este caso existe una gama muy limitada de plantas que crecerá en estas condiciones, por ello, es muy importante tener en cuenta la luz del sol que afectara al edificio en cuestión.

Para las zonas costeras donde los edificios pueden estar expuestos a vientos fuertes y frecuente, se deberán seleccionar algunas especies de plantas trepadoras o plantas más maduras que son más tolerantes al viento.

Mantenimiento

El ciclo de vida y la tasa de crecimiento de la planta afectará al tiempo que necesita para adecuarse a la fachada. Hay que considerar el tamaño de la planta una vez alcanzada su madurez así como el follaje requerido.

Algunas plantas empleadas en las fachadas vegetales, como el Higo (*Ficus Pumila*), requiere una poda de rejuvenecimiento para mantener el follaje juvenil. Con estas especies, el follaje adulto crece de manera horizontal y no se adhiere directamente al edificio y creando así, una capa más densa de tallos. Aunque esta capa provee una sombra efectiva y produce a su vez una capa aislante de aire entre el follaje y la pared, es inherentemente inestable, porque no está directamente conectada con el edificio.

Las especies de plantas trepadoras ideales para crear una pantalla eficaz contienen múltiples rasgos:

- ❖ Retención del follaje bajo
- ❖ Alta densidad de brotes
- ❖ Tolerancia y recuperación de varias podas (de rejuvenecimiento)
- ❖ Longevidad
- ❖ Tasa de crecimiento estable

Estos rasgos contribuyen a la producción de una capa vegetativa constante y uniforme. En su hábitat natural, muchas plantas trepadoras crecen hacia arriba hacia la luz entrelazándose, y con el tiempo, las plantas pierden la cubierta de follaje en su base.

En la siguiente tabla se exponen algunos de los factores importantes a tener en cuenta en la construcción de una fachada vegetal dependiendo de la especie de planta trepadora.

Ejemplo de plantas convenientes para fachadas vegetales en Victoria (No deberían ser consideradas como una lista exhaustiva o conveniente para todos los sitios).

Tabla.3. Comportamiento y tipo de plantas para fachadas vegetales.

Especies	Tipo	Cubrimiento y tasa de crecimiento	Tolerancia a la luz
<i>Akebia quinata</i>	Se entrelaza	Medio	Promedio
<i>Aphanopetalum resinosum</i>	Se entrelaza	Medio	Promedio
<i>Cissus antarctica</i>	Zarcillo	Medio	Requiere baja exposicion
<i>Clematis aristata</i>	Se entrelaza	Medio	Requiere baja exposicion
<i>Clematis arandii</i>	Se entrelaza	Bajo	Promedio
<i>Clematis montana*</i>	Se entrelaza	Bajo	Promedio
<i>Distichtus buccinatoria</i>	Zarcillo	Alto cubrimiento y tasa de crecimiento media	Requiere alta exposicion
<i>Ficus pumila</i>	Autoadherente	Alto cubrimiento y tasa de crecimiento media	Requiere alta exposicion
<i>Hibbertia scandens</i>	Se entrelaza	Medio	Requiere alta exposicion
<i>Muehlenbeckia complexa</i>	Se entrelaza	Alto	Promedio
<i>Kennedia rubicunda</i>	Se entrelaza	Cubrimiento medio y tasa de crecimiento alta	Requiere alta exposicion
<i>Pandorea pandorana</i>	Se entrelaza	Alta	Promedio
<i>Pandorea jasminoides</i>	Se entrelaza	Medio	Promedio
<i>Parthenocissus quinquefolia*</i>	Autoadherente	Alto cubrimiento y tasa de crecimiento media	Promedio
<i>Parthenocissus tricuspidata*</i>	Autoadherente	Alto	Requiere alta exposicion
<i>Vitis vinifera*</i>	Zarcillo	Cubrimiento medio y tasa de crecimiento alta	Requiere alta exposicion
<i>Trachelospermum jasminoides</i>	Se entrelaza	Alto cubrimiento y tasa de crecimiento media	Promedio
<i>Wisteria sinensis</i>	Se entrelaza	Cubrimiento bajo y tasa de crecimiento alta	Requiere alta exposicion

2. METODOLOGIA

2.1 CELULA PASSLINK

2.1.1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento térmico de la fachada vegetal se ha llevado a cabo utilizando el modelo presentado por Erkoreka. En los siguientes apartados se estudian bajo condiciones reales, los puntos fundamentales del experimento realizado en el LCCE.

2.1.2 ESCENARIO DE LA EXPERIMENTACIÓN

El escenario se situa en Vitoria-Gasteiz, en el Laboratorio de Control de Calidad en la edificación (LCCE). En el se empleo una célula de ensayo siguiendo la metodología PASSLINK. El objetivo es conocer las características térmicas y solares del edificio bajo condiciones ambientales reales, empleando una serie de procedimientos.

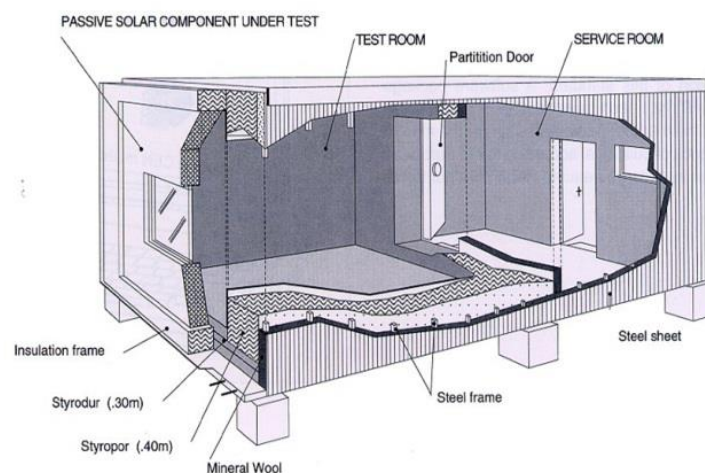


Fig. 2.1 Célula de ensayo PASSLINK

PASSYS (Passive Solar Components and Systems Testing) desarrollo una metodología de larga duración, en la que los resultados solo eran validos para estados estacionarios. Este método fue mejorado para obtener un sistema dinamico de menor duración y pudiendo obtener así, resultados mas precisos e información detallada. Una de las mejoras empleadas en la metodología PASSLINK fue el uso de baldosas HFS (Heat Flux Sensitive). Las baldosas estan fabricadas con plástico de baja conductividad térmica (pentinax), adheridos a su vez a una lamina de aluminio, lo cual ayuda en igualar la temperatura superficial. Al lado de las esquinas de cada baldosa, se situa una termopila, donde el flujo de calor tiende a ser igual al flujo medio que atraviesa la baldosa (fig. 9) y para medir la temperatura se usan los termopares.

2.1.3 DESCRIPCIÓN DE LA CÉLULA DE ENSAYO PASLINK

Para la obtención de resultados con las que se comparan las condiciones reales de un edificio, se contruye una zona de ensayo llamada célula paslink. Dicha celula tiene 5 m de longitud con sección cuadrada de 2.7 m de lado, estructurada con paredes muy aislantes salvo en la fachada sur, puesto que va a ser en esta donde es colocada la muestra a estudiar.

La zona de ensayo permite medir con alta precision los flujos de calor intercambiados, ya sean pérdidas o ganancias entre el ambiente exterior y el interior, pudiendo discriminar los intercambios a través del elemento a ensayar de los que se producen a través del resto de paredes.

Junto a la fachada norte de la zona de ensayo, se coloca un pequeño cuarto de servicios (ver Fig. 2.2). En ella se coloca la instrumentación necesaria para la medida y control de los ensayos pero siempre controlando al máximo la comunicación entre las dos estancias, para poder disminuir al máximo las posibles fugas de calor y reduciendo asi los minimos errores de medida.



Fig.2.2 Izda: Detalle del exterior de la célula Paslink, fachada de orientación oeste. Centro: sala de servicios ,en su interior se encuentra la instrumentación de control de la célula de ensayo. Dcha.: interior de la celda de ensayo sin muestra, fachada de orientación sur Definición de los componentes de ensayo

2.1.4 COMPOSICIÓN DE CELULA PASSLINK

En este apartado se detallara la composición de la celula passlink, analizando de esta manera los pasos que se han seguido para su construcción. De esta manera se lograran una serie de resultados reales y poder asi estudiar el rendimiento de la fachada vegetal.

2.1.4.1 Características del muro base de doble hoja

Consiste en un cerramiento vertical de doble hoja constituidos de exterior a interior. Se compone por los siguientes materiales:

1. Ladrillo caravista a media asta de 10,5 cm.
2. Camara de aire de 10 cm de espesor.
3. Tabique de ladrillo hueco doble de 6,4 cm de espesor.
4. Mortero de cemento junto a raseo fino de 1,5 cm de espesor.

La muestra tiene unas dimensiones de 2,7x2,7 metros y ha sido construida sobre un premarco aislante.

Características de los ladrillos utilizados mencionados anteriormente:

- El ladrillo hueco doble tiene unas dimensiones medidas de 322 mm de largo, 141 mm de alto y 64 mm de espesor. El peso medio medido del bloque es de 1.735 kg (Fig.2.3)

- El ladrillo caravista tiene unas dimensiones medidas de 49 mm de alto, 228 mm de largo y 105 mm de espesor. El peso medio medido del bloque ha sido de 2.463 kg (Fig.2.3).

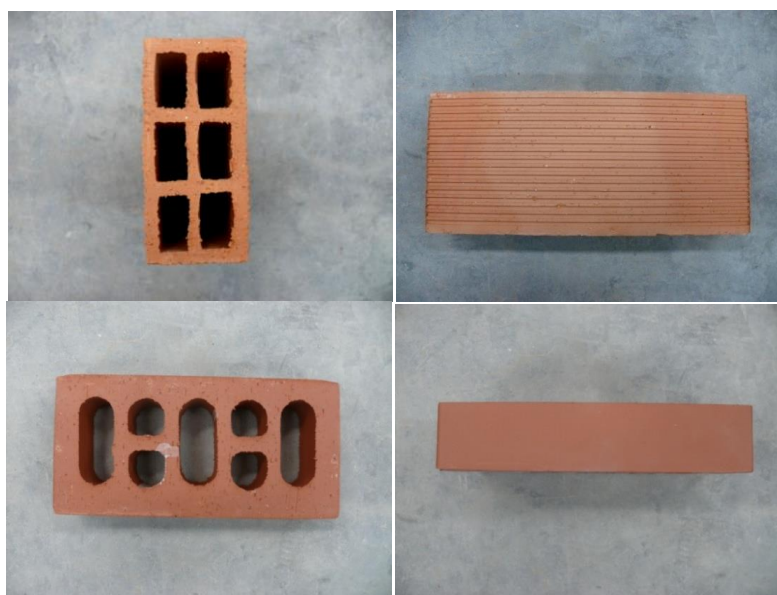


Fig.2.3 Arriba detalle del ladrillo hueco doble. Abajo detalle del ladrillo caravista

En la siguiente imagen (Fig.2.4) se pueden observar los dos tipos de ladrillos utilizados para este ensayo separados mediante la cámara de aire:



Fig. 2.4 Detalle del ladrillo hueco doble con cámara de aire y ladrillo caravista

En la siguiente imagen (Fig.2.5) se observa el detalle de la construcción del ladrillo caravista y el detalle de la distancia de la cámara de aire.



Fig. 2.5 .Detalle del ladrillo caravista y de la cámara de aire

A continuación (Fig.2.6) se presenta en detalle los pasos del levante de los ladrillos que componen la muestra del muro de hoja doble y su posterior raseo:



Fig. 2.6 Detalle del levante del ladrillo y raseado del muro base de doble hoja

En la siguiente imagen (Fig.2.7) vemos el detalle del espesor del revestimiento de mortero y el revestimiento de mortero (Fig.2.8) aplicado sobre el ladrillo caravista.

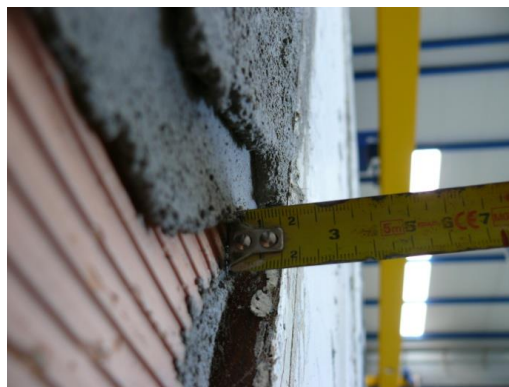


Fig.2.7 Detalle del mortero de cemento + Raseo fino de 1,5 cm



Fig.2.8 Fotografía de la aplicación de revestimiento de mortero de cemento sobre el muro base

2.1.4.2 Composición y características de la fachada vegetal

La fachada vegetal se compone con los siguientes materiales:

1. Un modulo vegetal
2. Subestructura metalica de soporte
3. Camara de aire 5 cm.
4. Sistema de riego y drenaje.

A continuación se presentan las características y composición de la fachada vegetal ensayada. En la Figura 2.9 se muestra de forma esquemática la muestra de fachada vegetal formada por el muro base más la estructura de soporte y los módulos prevegetados.

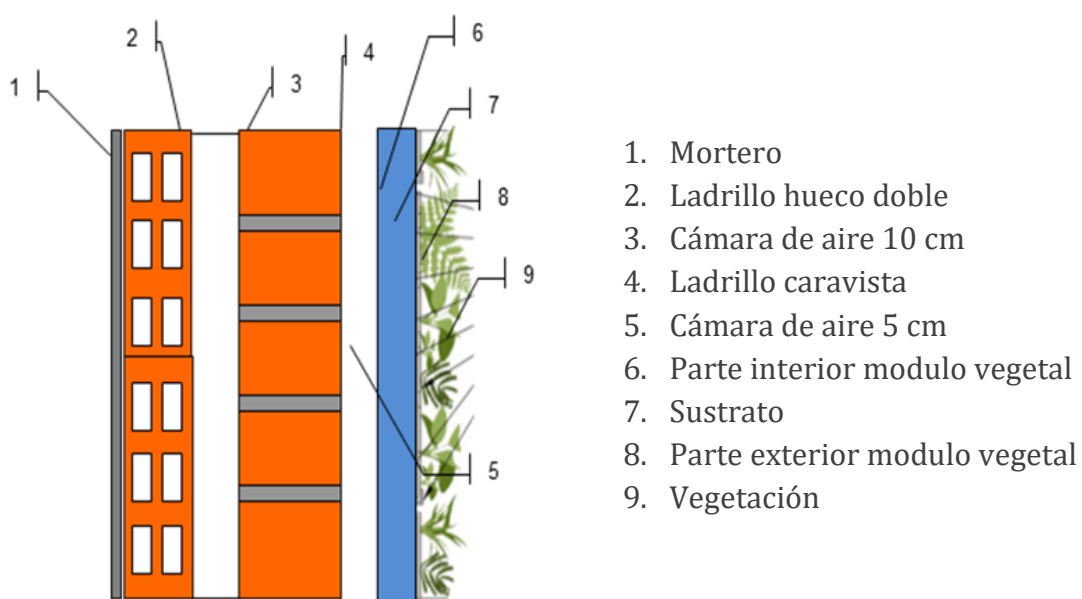


Fig. 2.9 .Detalle de la composición de la fachada vegetal ensayada

2.1.4.3 Composicion del Módulo vegetal

La unidad del modulo vegetal se considera sostenible puesto que estan contruidos de materiales reciclables. Constan de las siguientes partes:

- Modulo de polietileno reciclado.
- Sistema de anclaje.
- Sistema cerrado de fertirrigacion y drenaje.
- Sustrato.
- Vegetacion.

(Fig.2.11).

Lo módulos poseen unas dimensiones de 600x400x80 mm y estan fabricados en polietileno reciclado resistene a la radiación ultravioleta. Gracias a sus dimensiones se consigue una reserva de agua suficiente para cuando este a falta de ella. [138].

En la parte superior del modulo se encuentran cuatro entradas para los goteros y en la parte inferior dos salidas para el drenaje. Al ser estancos no se pierde agua, por lo tanto no es necesario impermeabilizar la pared. Del mismo modo, al tener una cobertura del 100 % no hace falta revocar la pared puesto que se ancla directamente a la fachada.

En la parte interior del modulo el sustrato se homogeneiza mediante separadores de polietileno. Cada modulo pesa 5kg en vacio, pudiendo alcanzar los 11 kg con el sustrato y las plantas prevegetadas en seco y hasta los 21 kg en estado saturado.

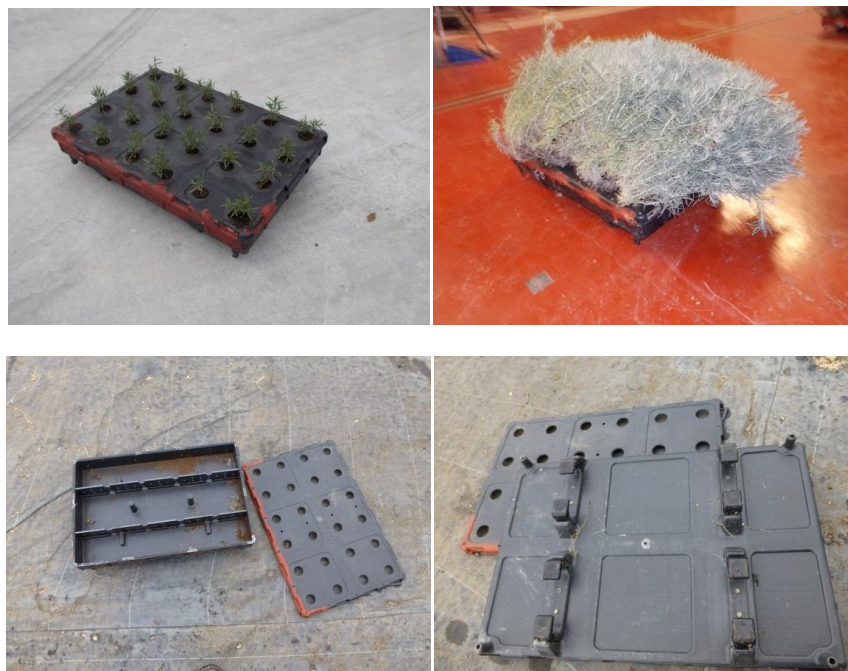


Fig. 2.11 .Detalle del modulo vegetal utilizado (a) con la plantas recién trasplantadas, (b) módulos con las plantas completamente desarrolladas, (c) detalle del interior de los módulos (d) detalle posterior del modulo con el gancho de sujeción a la estructura de anclaje

2.1.4.4 Estructura de anclaje

Una estructura vertical de acero inoxidable actua como elemento de soporte donde se colocan los modulos. De esta manera se sujetan los modulos vegetales a la fachada del edificio. El modulo vegetal tiene cuatro ganchos de polietileno reciclado y se utilizan para sujetarse a la estructura horizontal secundaria. Gracias a esta estructura los modulos quedan fijados y no permiten su extracción, evitando de esta manera el robo. En las siguientes imágenes se detalla el montaje de la estructura de la fachada vegetal modular sobre el muro base:



Fig. 2.12 Detalle del proceso de montaje de la estructura de anclaje, desde la llegada de la propia estructura metálica hasta su posterior colocación

2.1.4.5 Sistema de riego y drenaje

Como muchas de las plantas existentes, las utilizadas en las fachadas vegetales requieren un adecuado riego y aporte de nutrientes para que estas puedan trabajar y crecer en condiciones adecuadas.

El sistema de riego utilizado en el ensayo es automático y responde a las técnicas de fertirriego utilizadas en cultivos hidropónicos. Las plantas están adjuntas a una red de tuberías de goteo que distribuyen la solución nutritiva en pequeñas cantidades evitando el derroche de agua. El sistema se complementa con elementos de filtrado, control de

riego para adecuar el caudal de goteo a las necesidades de las plantas y una bomba para distribuir el agua a lo largo de la fachada.

El diseño de riego es muy amplio, puede ser desde un sistema de riego individual hasta un sistema conjunto que conecta todos los módulos. De manera que también se puede variar el diseño de los tipos de plantas combinando plantas de elevadas necesidades hídricas con las de baja necesidad. Los módulos tienen dos salidas inferiores para el agua de drenaje que confluyen en una salida general.



Fig. 2.13 Detalle del proceso de montaje del sistema de riego y drenaje. Arriba: Colación del sistema de riego, mangueras de riego, goteros autocompensantes y piquetas en los módulos. Abajo: instalación del sistema de drenaje y del sistema de bombeo

2.2 EQUIPOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA INTERIOR

2.2.1 MEDIDA DE TEMPERATURA DEL AIRE INTERIOR

El ensayo en Células PASLINK se basa en una sala de ensayo de un volumen representativo que imita las condiciones reales de una habitación estándar de un edificio. El ambiente de la sala de ensayo está completamente controlado y supervisado minuto a minuto. Las dimensiones útiles interiores de la sala de ensayo son las siguientes 2.7 x 2.7 [m] con una profundidad de 5 metros, lo que supone un volumen de control de 36.5 m³.

En el interior de la sala de ensayo se mantiene la homogeneidad necesaria. Aunque la temperatura exterior varíe no afecta al interior de la sala y para que en el estado de reposo no se produzcan estratificaciones del aire se coloca en el centro de la sala un ventilador.

En las siguientes imágenes (Fig. 2.14) se muestran los detalles interiores de la célula de ensayo, tanto los sensores utilizados para la medida de temperatura de aire y superficie y el ventilador.



Fig. 2.14 Detalles interiores de la célula para la muestra de temperatura de aire interior

2.3 EQUIPOS DE MEDIDA DE TEMPERATURA EXTERIOR Y DATOS CLIMATOLÓGICOS

La medida de la temperatura exterior junto con la recopilación de los datos climatológicos tiene una importancia fundamental, ya que la diferencia entre la temperatura del aire interior y la temperatura del aire exterior es la fuerza impulsora del flujo de calor a través de la muestra.

El flujo de calor junto con las temperaturas del aire interior de la célula de ensayo y la temperatura del aire exterior y la radiación solar son las principales magnitudes utilizadas para obtener las propiedades térmicas de la muestra ensayada.



Fig. 2.15 Detalles exteriores de la célula para la medida de temperatura de aire exterior

2.3.1 MEDIDA DE RADIACION SOLAR

La radiación solar junto con la temperatura exterior son las variables ambientales más importantes a tener en cuenta en los ensayos realizados. Esto hace que la medición de la radiación solar incidente sobre la muestra sea significativa. El flujo de radiación solar participa en el intercambio de calor entre la muestra y la célula de ensayo. Para evitar al máximo su incidencia, la celda Paslink se encuentra totalmente apantallada de la radiación solar mediante unas lonas blancas.



Fig. 2.16 Mediciones de radiación solar

2.3.2 MEDIDA DE CO₂

Otros parámetros que se han medido han sido la concentración de CO₂ en la fachada vegetal y en la estación meteorológica.



Fig. 2.17 Detalles de medida de CO₂

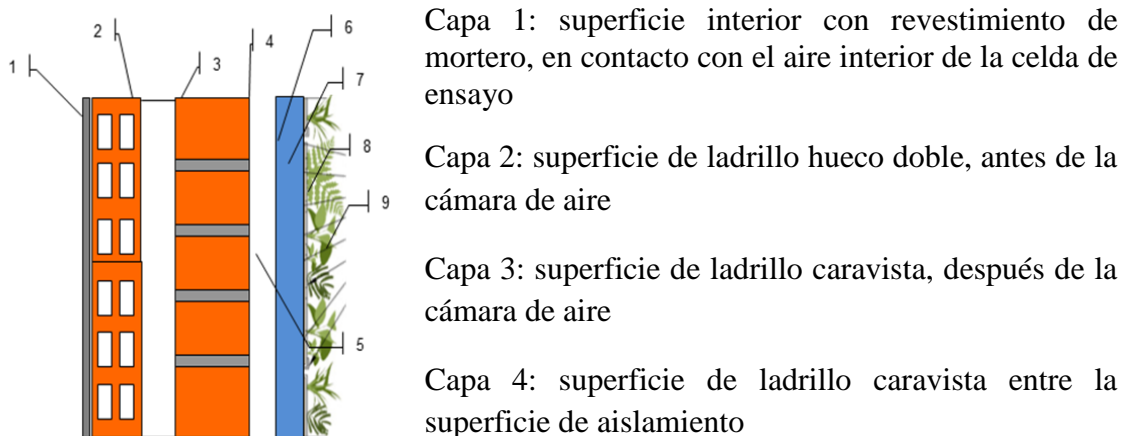
2.4 INSTRUMENTACIÓN DE LA FACHADA VEGETAL

En los anteriores apartados se ha estudiado la composición de la fachada vegetal. Ahora se va a proceder a analizar el comportamiento de este. Para ello se utilizarán los siguientes sensores en las distintas capas ya mencionadas:

- Sensor de temperatura de superficie.
- Sensor de temperatura de aire.
- Sensor de flujo de calor.
- Sensor de humedad relativa.

La razón de esta instalación es la de conseguir la caracterización del comportamiento térmico de la muestra (transmitancia térmica y capacidad térmica) y posterior validación del modelo numérico desarrollado.

El esquema de la fachada vegetada así como la descripción de sus capas se muestra en la Fig. 2.18. Los códigos de los sensores utilizados se observan en la Tabla 4. y la distribución y detalle de su colocación se puede ver en la Fig. 2.19.



Capa 5: cámara de aire

Capa 6: superficie interior del módulo vegetal después de la cámara de aire





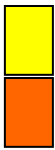

Capa 7: sustrato del módulo vegetal

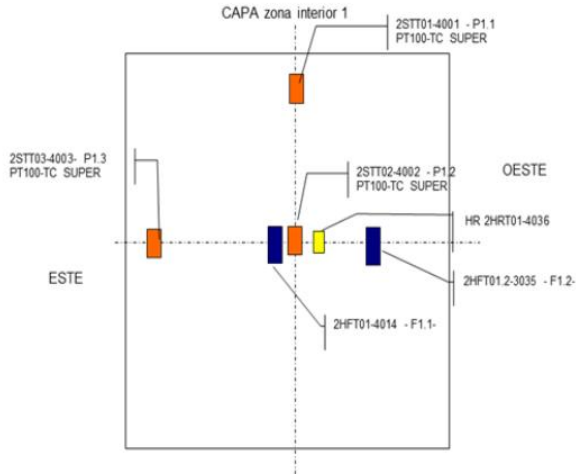
Capa 8: Superficie exterior del módulo vegetal, en contacto con el aire exterior


Capa 9: superficie foliar

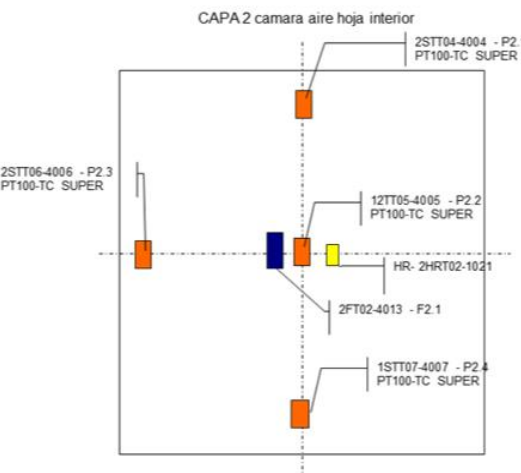
Fig. 2.18 Esquema de la composición de la fachada vegetal estudiada. Cada una de las capas está numerada e identificada


Tabla 4. Código de los sensores utilizados

Sensor de temperatura PT100 (Platinum thermoresistance)		Sensor de humedad relativa	
Sensor de flujo		Sensor velocidad de aire	
Sensor de temperatura y humedad		Sensor de CO ₂	











CAPA 3 camera aire zona exterior

CAPA 4 caravista exterior

CAPA 5 (cámara de aire)

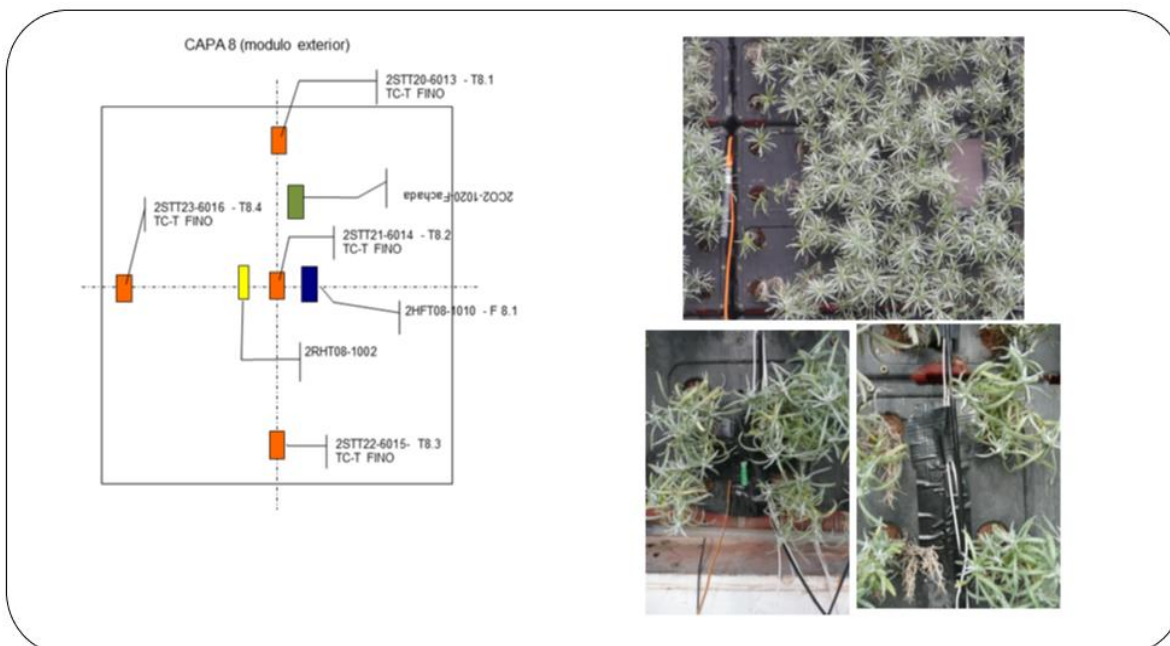
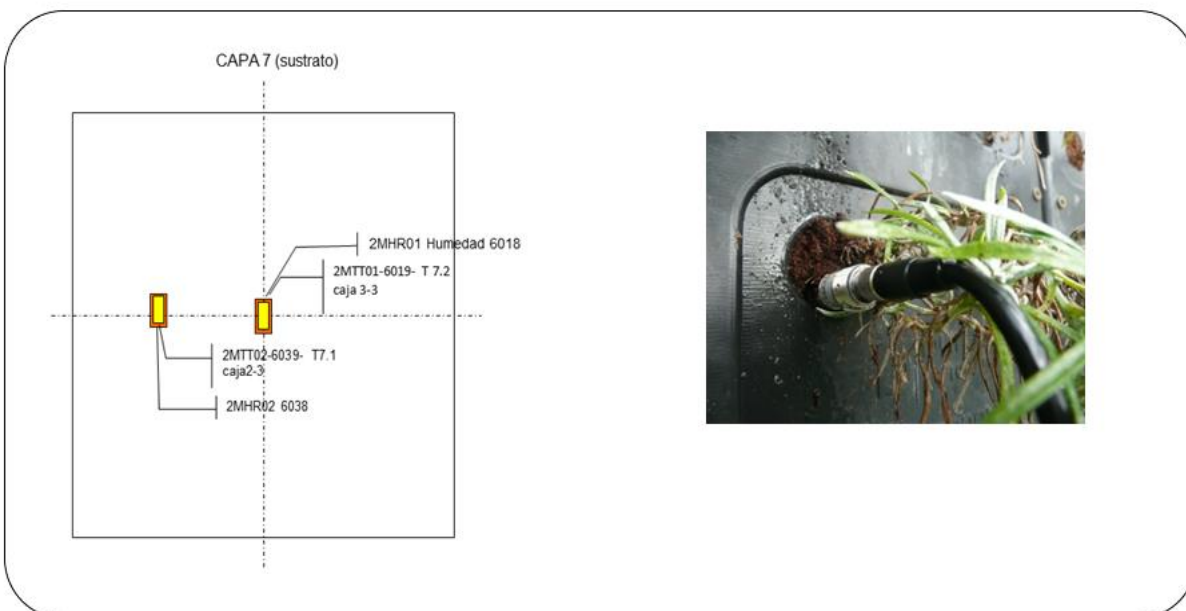
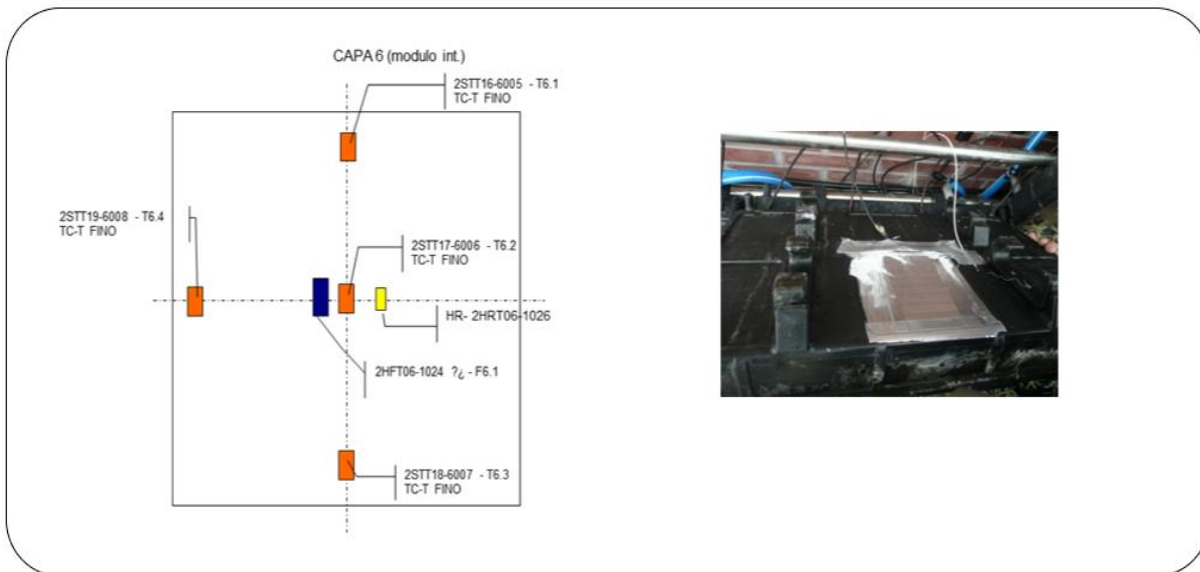


Fig. 2.19 Descripción de la instrumentación utilizada en las diferentes capas de la fachada vegetal

3 CALCULOS

En este apartado se recoge la información dada por la experimentación en la célula de ensayo. A continuación, se procede a analizar los datos y obtener una serie de resultados los cuales van a demostrar el comportamiento real de las fachadas vegetales en la edificación.

Antes de ello, se definen los parámetros necesarios para obtener los resultados.

3.1 EFICIENCIA DE LAS CUBIERTAS VEGETALES

Después de haber estudiado que la instalación de fachadas vegetales comparado con las convencionales, aportan grandes beneficios térmicos, acústicos, ambientales etc. se procede a analizar el comportamiento y ver realmente si la eficiencia de esta cumple con las expectativas. Para valorar el aislamiento térmico en una zona concreta de la fachada se presenta el término eficiencia.

Se conoce a eficiencia como el ratio de las diferentes temperaturas:

$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_g}{T_{max} - T_{min}}$$

Ecuación 1-1

Donde:

T_g= Temperatura exterior del sustrato

T_{max}, T_{min}= Límites mínimo y máximo de la temperatura

Para el cálculo de la temperatura máxima se utiliza el método utilizado por ASHRAE denominado T_{soil-air}. En cambio, la temperatura mínima se logra mediante la temperatura exterior y la humedad relativa. Dependiendo de la estación del año en la que se analicen los datos T_{max} y T_{min} representarían el mejor o peor escenario posible. Por ejemplo, en verano la eficiencia máxima se dará cuando la temperatura exterior del sustrato (T_g) sea igual a T_{min} y en invierno, cuando T_g sea igual a la temperatura máxima.

3.2 TEMPERATURA MÁXIMA, TSOL-AIR

De acuerdo con el método proporcionado por ASHRAE , T_{sol-air} se define como la temperatura del aire exterior que en ausencia de todo intercambio de radiación da la misma tasa de entrada de calor en la superficie externa como daría la combinación de la radiación solar incidente, el intercambio de radiación con el cielo y el ambiente exterior, y el intercambio de calor por convección con el aire exterior.

Considerando el balance térmico por metro cuadrado en una superficie soleada, se puede obtener el flujo de calor a partir de estos tres términos:

$$\frac{q}{A} = \alpha E_t + h_0(T_0 - T_s) - \varepsilon \Delta R$$

Ecuación 1-2

α = absortancia de la superficie para la radiación solar

E_t = radiación solar total incidente en la superficie (W/m²)

h_0 = coeficiente de transferencia de calor por radiación de onda larga y convección con la superficie exterior (W/m²K)

T_0 = temperatura exterior

T_s = temperatura de la superficie

ε = emisividad de la superficie

ΔR = diferencia entre la radiación de onda larga incidente en la superficie y la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura exterior (W/m²)

Asumiendo que la tasa de transferencia de calor puede ser expresada como:

$$\frac{q}{A} = h_0(T_{sol-air} - T_s)$$

Ecuación 1-3

Resolviendo las ecuaciones (1-2) y (1-3) se puede aislar $T_{sol-air}$:

$$T_{sol-air} = T_0 + \frac{\alpha E_t}{h_0} - \frac{\varepsilon \Delta R}{h_0}$$

Ecuación 1-4

Para una fachada con una superficie vertical se asume que la radiación de onda larga incide desde el cielo y desde otras superficies, por lo que un valor apropiado de ΔR sera en torno a los 63 W/m², tomando que la emisividad es igual a 1 y

$h_0 = 17$ W/m²K, se puede considerar que el término de corrección por radiación de onda larga se aproxima a 4 K .

Para el término $\frac{\alpha}{h_0}$ se considera oportuno emplear un valor de 0,052, que es el máximo valor para cualquier tipo de superficie cuya luminosidad permanente no puede ser predicha de manera precisa.

Asumiendo estos valores queda claro que el cálculo de $T_{sol-air}$ solo cobra sentido cuando existe una radiación solar elevada, de otra manera bastaría con reducir 4 K a la temperatura exterior.

3.3 TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

La temperatura del aire que se enfria hasta el estado de saturación es denominada como la temperatura de bulbo húmedo. Se puede medir mediante un termómetro de mercurio con el bulbo envuelto en un paño de algodón empapado de agua. Al proporcionarle una corriente de aire, el agua se evapora más o menos rápidamente dependiendo de la humedad relativa del ambiente debido al calor latente de evaporación del agua.

La temperatura de bulbo húmedo es siempre menor que la temperatura de bulbo seco, a excepción de cuando existe un 100 % de humedad relativa. Por ello se asume cómo la T_{min} de la superficie de la cubierta y por tanto el mejor escenario para mantener el edificio lo más frío posible.

Esta temperatura puede calcularse a partir de la temperatura exterior del aire y de la humedad relativa, aplicando la ecuación proporcionada por Stull en:

$$T_w = T \cdot \alpha \tan \left[0,151977 \cdot (RH\% + 8,313659)^{\frac{1}{2}} \right] + \alpha \tan(T + RH\%) + 0,00391838 \cdot (RH\%)^{\frac{3}{2}} \cdot \alpha \tan(0,023101RH\%) - 4,686035$$

Ecuación 1-5

3.4 EVALUACION DE EFICIENCIA

En las fachadas vegetales se presentan alteraciones en su comportamiento dependiendo de dos factores relevantes:

- La capa de sustrato y la de drenaje que tiene una conductividad térmica efectiva dependiente del agua en dichas capas.
- La tasa de transferencia de calor esta relacionada con la temperatura que hay en la capa externa del sustrato situada en la fachada.

CASO 1: INVIERNO. Días fríos con plenitud de agua disponible en la capa de drenaje y en la capa de sustrato. Esto se dará en otoño e invierno tras días lluviosos y tanto en días soleados como nublados.

CASO 2: Este periodo se ha definido como **VERANO HUMEDO.** Días soleados con plenitud de agua disponible en la capa de drenaje y en la capa de sustrato. Esto se dará en días de primavera y verano tras periodos de mucha lluvia.

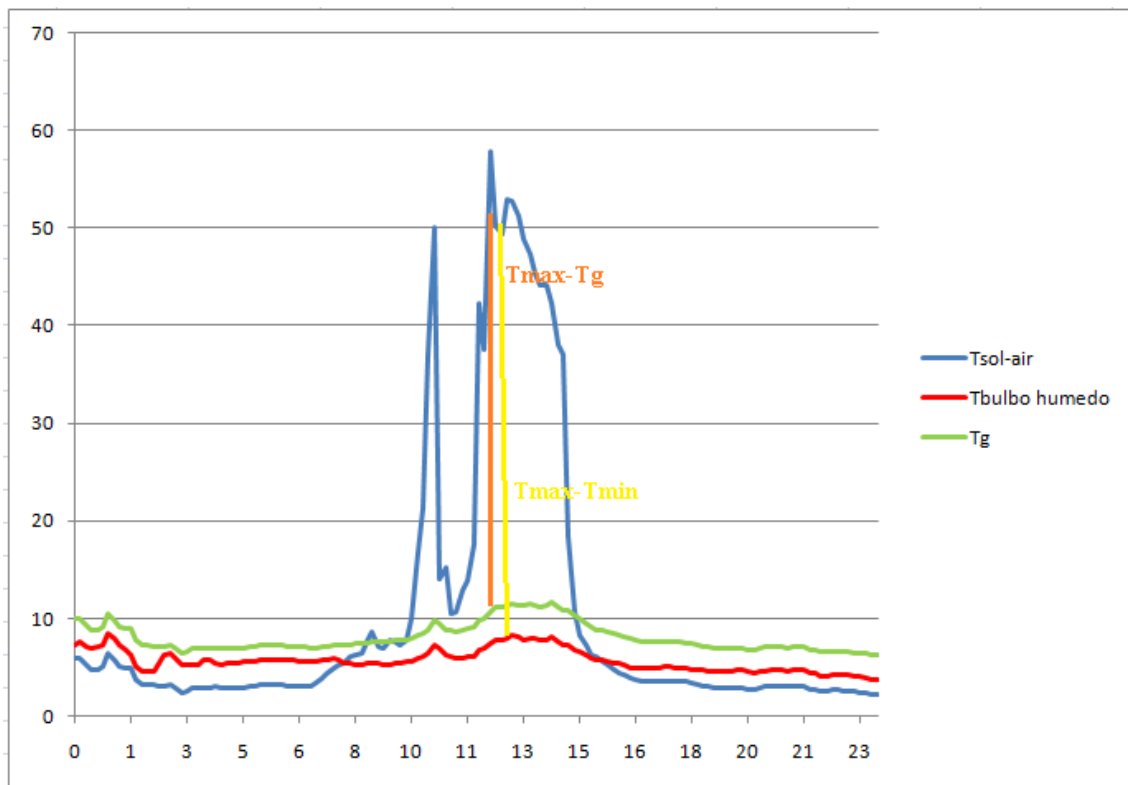
CASO 3: Denominado como **VERANO SECO.** Días soleados sin agua disponible ni en el sustrato ni en la capa de drenaje. Esto ocurrirá en días de primavera y verano tras una o dos semanas sin llover.

CASO 1: INVIERNO

En este caso se han tomado los datos del día 16 de enero como referencia para estudiar el comportamiento de las fachadas vegetales en días húmedos y fríos. Calculando los datos de temperatura máxima y del bulbo húmedo calculamos la eficiencia en dicho día.

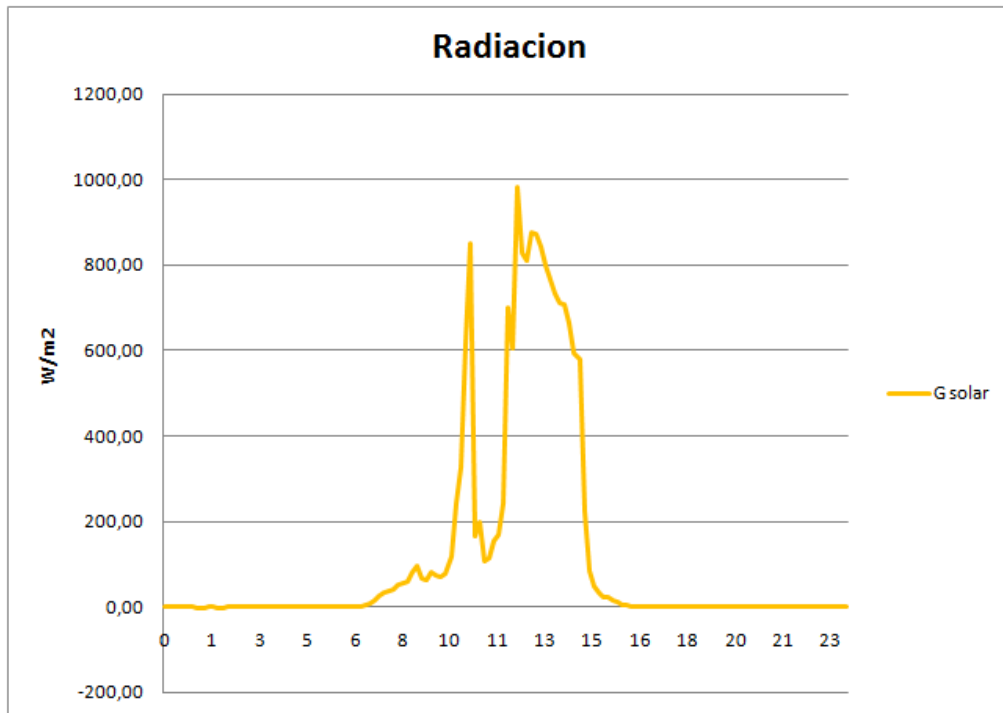
Día: 16/01/2014			
HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	57,82	7,40	10,74

$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_g}{T_{max} - T_{min}} \qquad \varepsilon = \frac{57,82 - 10,74}{57,82 - 7,40} = 0,93$$



Grafica 3.4.1

En la grafica 3.4.1 se observa que la eficiencia está definida como el ratio entre la vertical naranja ($T_{max} - T_g$) y la amarilla ($T_{max} - T_{min}$). La eficiencia máxima de 0,93, se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato $10,74^{\circ}\text{C}$ (T_g) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo $7,40^{\circ}\text{C}$, a las 12:00 del mediodía.

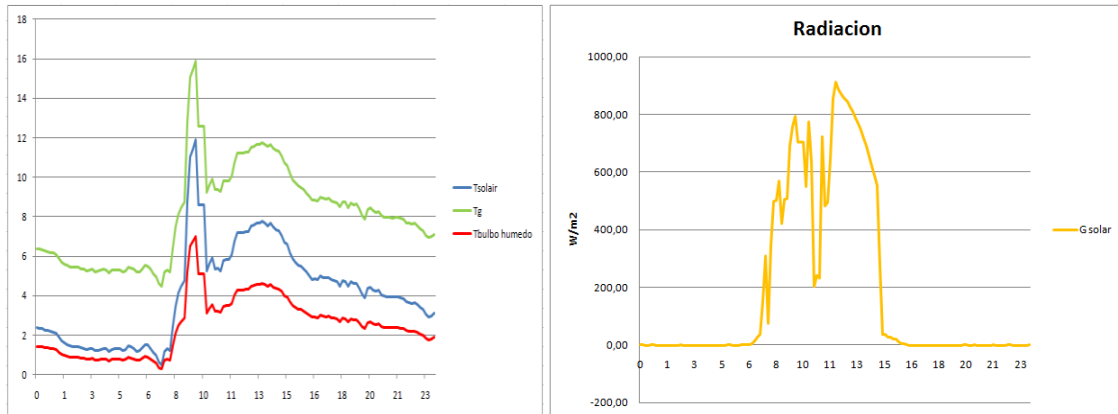


Grafica 3.4.2

Es muy importante el comportamiento de las temperaturas dependiendo de la radiación recibida en los días a estudiar. Como se muestra en la grafica, en invierno la radiación solar abarca pocas horas del día, desde las 10:00 hasta las 15:00 y se llega hasta un máximo de 950 W/m² y un mínimo de 110 W/m². En las horas nocturnas, amanecer, atardecer o días muy nublados en las que la radiación solar no incide, se desprecia el calculo de T_{sol-air} puesto que los valores resultantes son incluso menores que T_{min}. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en invierno, se dara entre las horas con una radiación mínima de 130W/m².

A continuacion se reflejan los datos y resultados en la semana de Enero:

Dia: 17/01/2014			
HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
09:00	11,89	7,01	15,89



Grafica 3.4.3

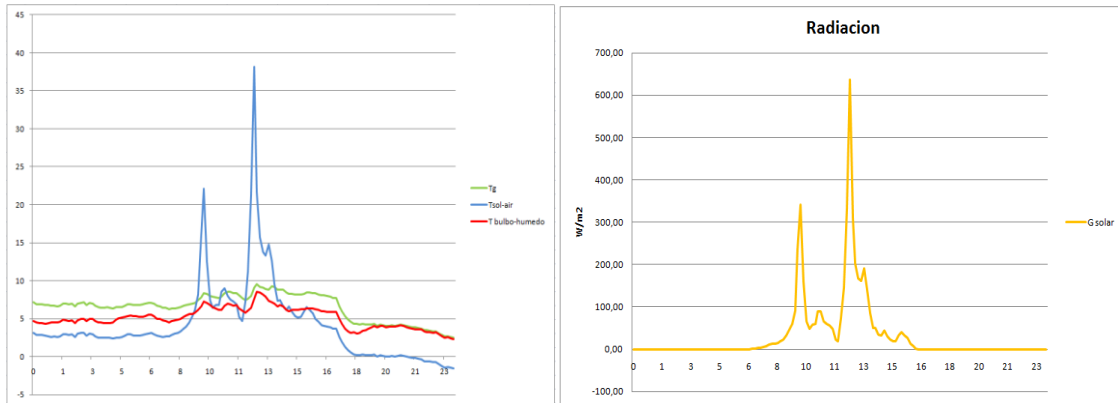
$$\varepsilon = \frac{11,89 - 15,89}{11,89 - 7,01} = -0,8$$

En la grafica 3.4.3 se observa por una parte el grafico de eficiencia y por otro lado el de la radiación solar para el dia 17 de Enero de 2014. La eficiencia es negativa en este caso porque la temperatura de la capa externa del sustrato representada con una línea verde (15,89 °C) es mayor que la temperatura máxima, (11,89 °C) línea azul. La temperatura de bulbo húmedo es de 7,01 °C y estos datos se recojen a las 09:00.

En este caso, aun siendo un dia de invierno, la radiación solar fue bastante considerable puesto que abarca desde las 06:00 hasta las 15:00 y se alcanzan valores máximos de 900 W/m² y minimos de 100W/m².

Dia: 18/01/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	38,14	7,64	9,07



Grafica 3.4.4

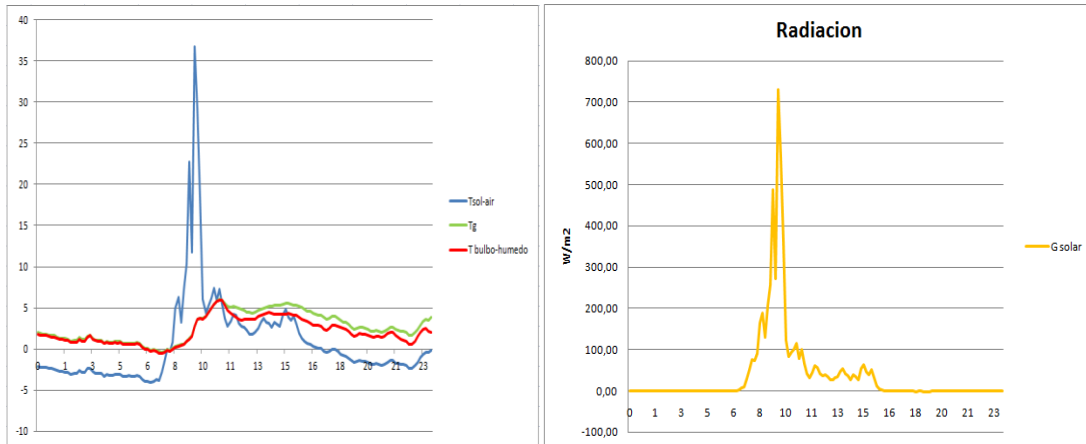
$$\varepsilon = \frac{38,14 - 9,07}{38,14 - 7,64} = 0,95$$

En la grafica 3.4.4 se observa que la eficiencia máxima es de 0,95 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 9,07 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 7,64 °C, a las 12:00 del mediodía.

Como se muestra en la grafica, el 18 de Enero, la radiación solar abarca pocas horas del día, desde las 08:00 hasta las 15:00 y se llega hasta un máximo de 630 W/m2 y un mínimo de 50 W/m2. En las horas nocturnas, amanecer, atardecer o días muy nublados en las que la radiación solar no incide, se desprecia el calculo de Tsol-air puesto que los valores resultantes son incluso menores que Tmin. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en invierno, se dara entre las horas con una radiación minima de 130W/m2.

Dia: 19/01/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
09:00	36,80	2,76	2,81



Grafica 3.4.5

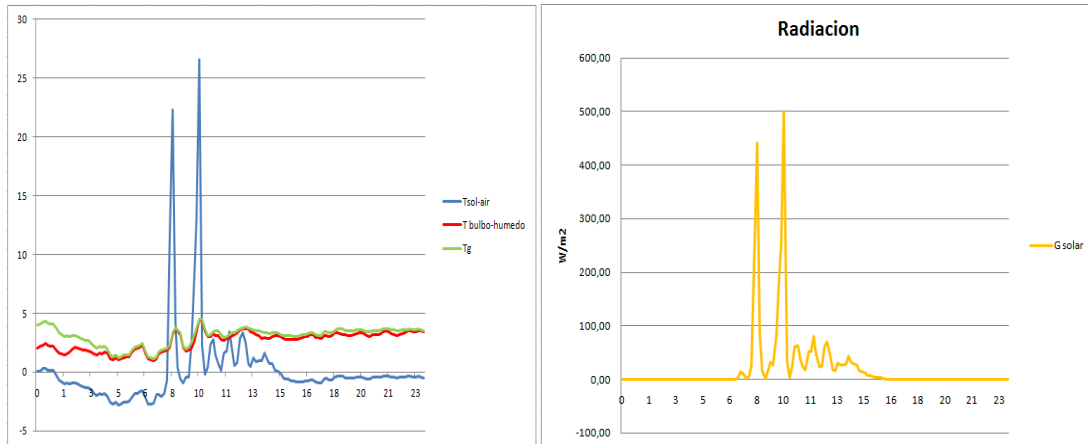
$$\varepsilon = \frac{36,80 - 2,81}{36,80 - 2,76} = 0,99$$

En la grafica 3.4.5 se observa que la eficiencia máxima es de 0,99 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 2,81 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 2,76 °C, a las 09:00 de la mañana. En este caso, se refleja muy bien el parecido de las líneas roja y verde por el cual la eficiencia alcanza valores muy elevados.

En la grafica de la radiación del 19 de Enero se aprecia como la incidencia solar abarca muy pocas horas, de 08:00 hasta las 10:00 alcanzando los 710 W/m². A partir de las 10:00 se observa que la radiación disminuye considerablemente hasta los 50 W/m² lo cual se va a despreciar para el estudio de la eficiencia como bien se ha comentado anteriormente.

Dia: 20/01/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
10:00	26,55	4,40	4,51



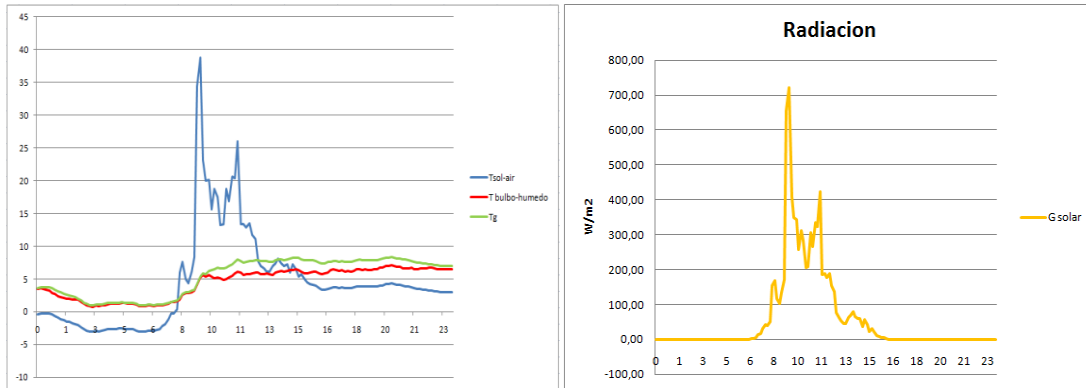
Grafica 3.4.6

$$\varepsilon = \frac{26,55 - 4,51}{26,55 - 4,40} = 0,99$$

La eficiencia es máxima cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 4,51 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 4,40 °C a lo largo del día 20 de Enero. La línea roja y verde representan dichos valores y son muy semejantes durante todo el día y solo cuando la radiación incide de 08:00 a 10:00 son inferiores a la temperatura máxima, T Sol-air. La radiación alcanza valores de 500 W/m² y disminuyen a partir de las 10:00 en adelante siendo despreciables.

Dia: 21/01/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
09:00	38,80	5,27	5,35



Grafica 3.4.7

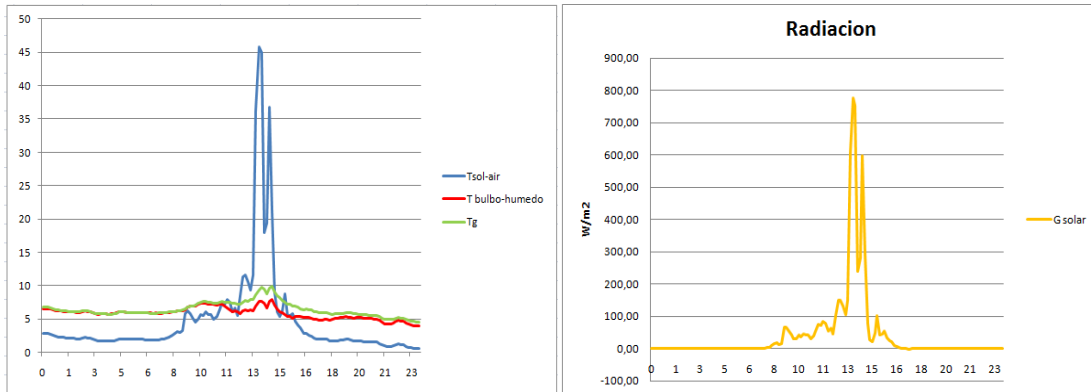
$$\varepsilon = \frac{38,80 - 5,35}{38,80 - 5,27} = 0,99$$

En la grafica 3.4.7 se observa que la eficiencia máxima es de 0,99 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 5,35 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 5,27 °C, a las 09:00 de la mañana.

El 21 de Enero, la radiación incide desde las 08:00 hasta las 10:00 alcanzando 710 W/m2 y disminuyen hasta los 30 W/m2 siendo valores despreciables porque los valores de Tsol-air son incluso menores que Tmin.

Dia: 22/01/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
13:00	45,79	7,68	9,40

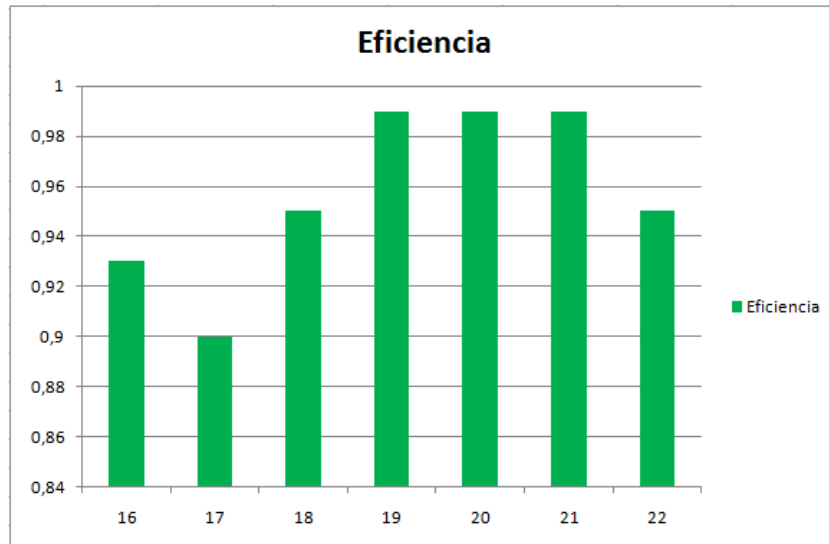


Grafica 3.4.8

$$\varepsilon = \frac{45,79 - 9,40}{45,79 - 7,68} = 0,95$$

Obteniendo los valores de temperatura exterior del sustrato (9,40 °C) y la temperatura de bulbo húmedo (7,68 °C) a la 13:00 del mediodía, se obtiene la eficiencia máxima de 0,95. A la 13:00 del mediodía, la radiación solar incide en su punto álgido alcanzando 780 W/m² y en ese momento se obtiene la eficiencia máxima. Desde que el sol comienza a esconderse en adelante, la radiación disminuye hasta 20 W/m² y hasta el amanecer se considera despreciable.

Despues de calcular las eficiencias en una semana de Enero se obtiene este grafico como modelo de la eficiencia en el caso propuesto: CASO 1 INVIERNO.



Grafica 3.4.9

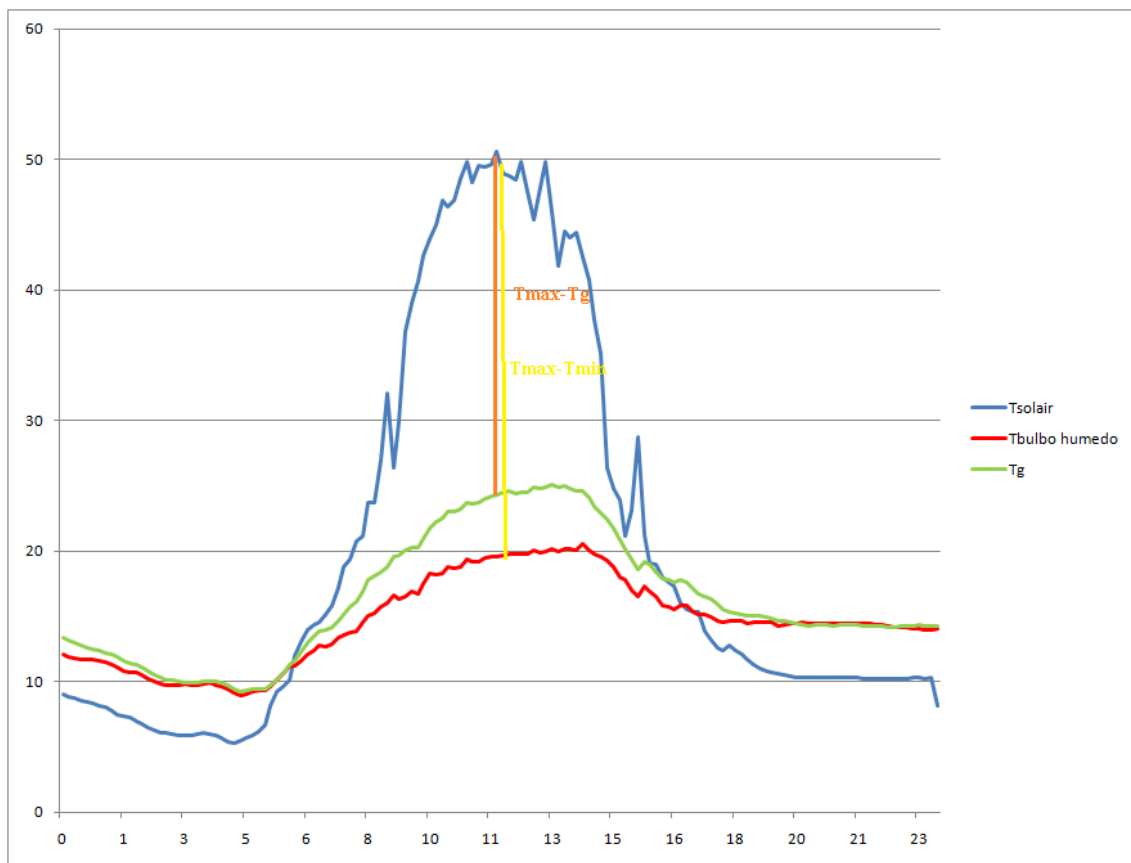
Para obtener un valor de la eficiencia desde el día 16 de Enero hasta el 22 de Enero se han calculado las medias de eficiencia para cada uno de los días. Como se observa en la grafica, en días de invierno las eficiencias son muy considerables (máximo de 0,99) puesto que la lluvia y el frio contribuyen en el porcentaje de agua existente de la capa de sustrato y drenaje y que la temperatura que hay en la capa externa es inferior. Por lo tanto, se demuestra que en los días húmedos y con temperaturas bajas el comportamiento de la fachada vegetal es satisfactorio.

CASO 2: VERANO HUMEDO

En este caso se han tomado los datos del día 10 de Mayo como referencia puesto que interesa estudiar días más calidos pero húmedos para ver la respuesta de las fachadas vegetales en dicho clima. Calculando los datos de temperatura máxima y del bulbo húmedo calculamos la eficiencia en dicho día.

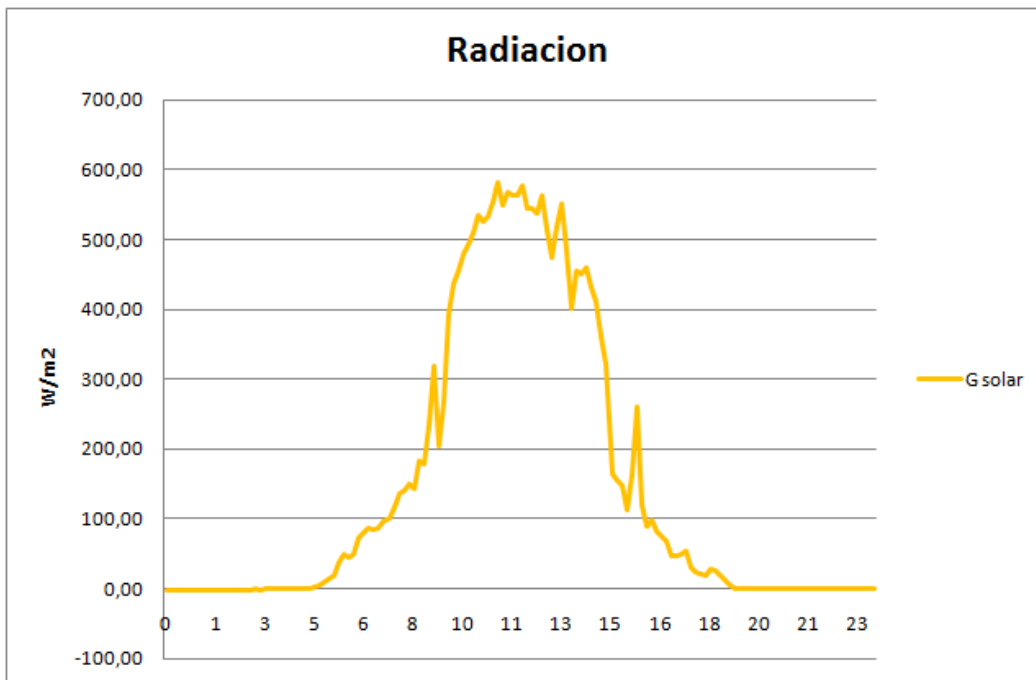
Dia: 10/05/2014			
HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
11:00	50,59	19,54	24,29

$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_g}{T_{max} - T_{min}} \qquad \varepsilon = \frac{50,59 - 24,29}{50,59 - 19,54} = 0,84$$



Grafica 3.4.10

En la grafica 3.4.10 se observa que la eficiencia esta definida como el radio entre la vertical naranja ($T_{max} - T_g$) y la amarilla ($T_{max} - T_{min}$). La eficiencia máxima de 0,84, se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato (24,29 °C) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo (19,54 °C), a las 11:00 del mediodia.

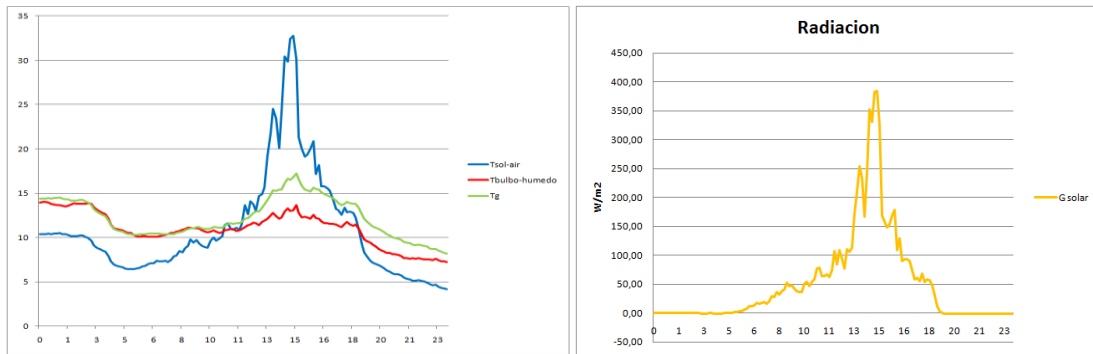


Grafica 3.4.11

Como se muestra en la grafica, en verano la radiación solar abarca mas horas que en invierno, de 06:00 a 18:00 para ser exactos, alcanzando los 590 W/m². En las horas nocturnas o días muy nublados en las que la radiación solar no incide, se desprecia el calculo de T_{sol-air} puesto que los valores resultantes son incluso menores que T_{min}. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en verano humedo se dara entre las horas con una radiación minima de 60 W/m².

A continuacion se reflejan los datos y resultados en la semana de Mayo:

Dia: 11/05/2014			
HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
14:00	32,74	13,10	16,77



Grafica 3.4.12

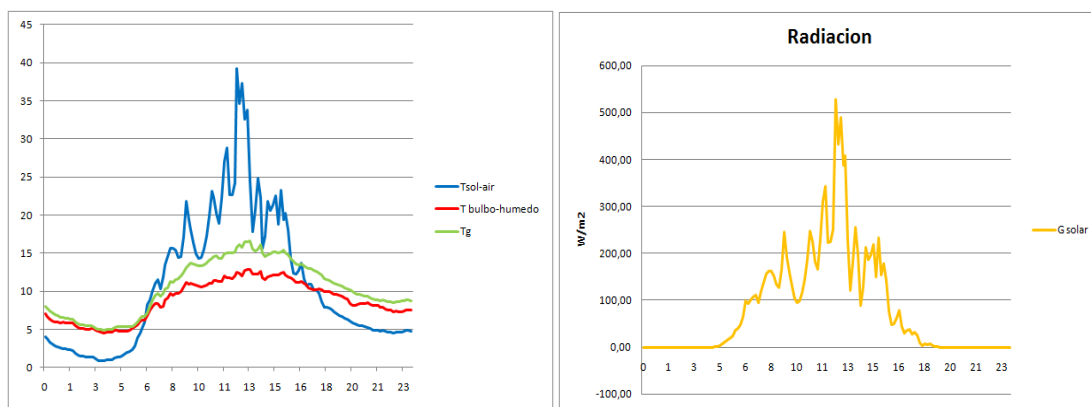
$$\varepsilon = \frac{32,74 - 16,77}{32,74 - 13,10} = 0,81$$

En la grafica 3.4.12 se observa que la eficiencia máxima es de 0,81 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 16,77 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 13,10 °C, a las 14:00 del mediodia.

Como se muestra en la grafica, el 11 de Mayo, la radiación solar abarca pocas horas del dia, desde las 06:00 hasta las 18:00 y se llega hasta un máximo de 390 W/m2 y un minimo de 30 W/m2. En las horas nocturnas, amanecer, atardecer o días muy nublados en las que la radiación solar no incide, se desprecia el calculo de Tsol-air puesto que los valores resultantes son incluso menores que Tmin. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en verano humedo, se dara entre las horas con una radiación minima de 60 W/m2.

Dia: 12/05/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
11:00	39,25	12,47	15,77



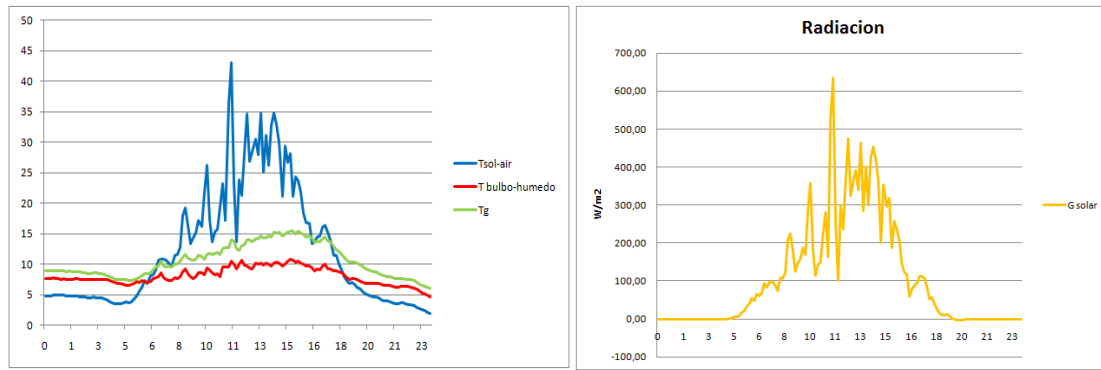
Grafica 3.4.13

$$\varepsilon = \frac{39,25 - 15,77}{39,25 - 12,47} = 0,87$$

En la grafica 3.4.13 se observa para el día 12 de Mayo, por una parte las temperaturas definidas anteriormente, y por otro lado la radiación. En las horas que la radiación apenas incide (de 18:00 a 05:00), los valores de la temperatura exterior del sustrato y temperatura de bulbo húmedo son incluso mayores que la temperatura máxima, T sol-air, siendo el valor minimo de radiación de 30 W/m2. A las 11:00 la eficiencia es maxima con un valor de 0,87, siendo la temperatura exterior del sustrato 15,77 °C y la del bulbo húmedo 12,47 °C.

Dia: 13/05/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
11:00	43,07	10,51	14,03



Grafica 3.4.14

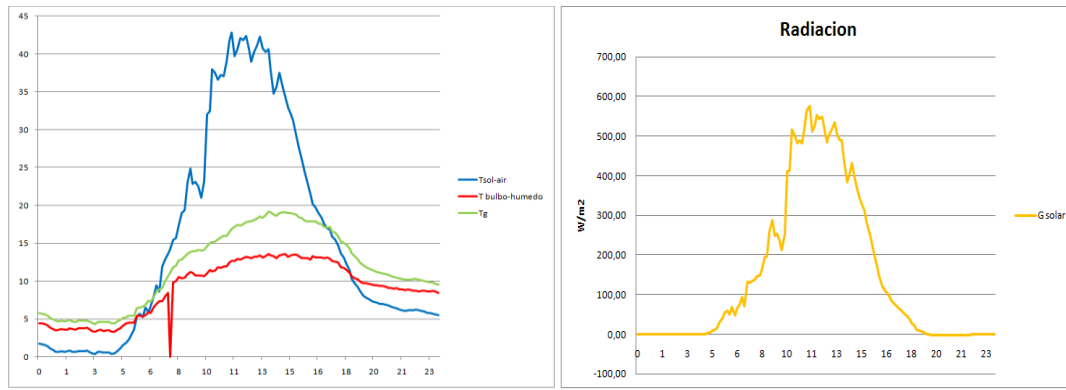
$$\varepsilon = \frac{43,07 - 14,03}{43,07 - 10,51} = 0,89$$

En la grafica 3.4.14 se observa que la eficiencia máxima es de 0,89 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 14,03 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 10,51 °C, a las 11:00 del mediodia.

Como se muestra en la grafica, el 13 de Mayo, la radiación solar incide desde las 06:00 hasta las 18:00 y se llega hasta un máximo de 630 W/m2 y un mínimo de 50 W/m2. En las horas nocturnas, amanecer, atardecer o días muy nublados en las que la radiación solar no incide, se desprecia el calculo de Tsol-air puesto que los valores resultantes son incluso menores que Tmin. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en verano, se dara entre las horas con una radiación minima de 60 W/m2.

Dia: 14/05/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
11:00	42,79	12,66	16,89



Grafica 3.4.15

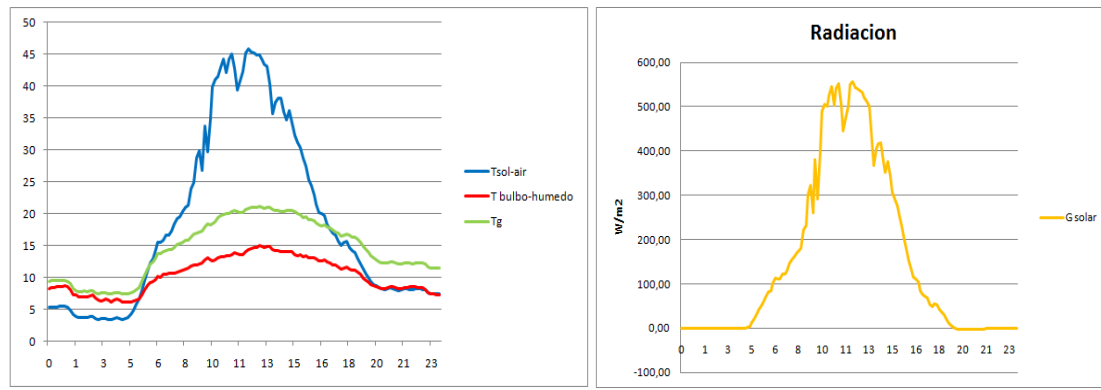
$$\varepsilon = \frac{42,79 - 16,89}{42,79 - 12,66} = 0,85$$

En la grafica 3.4.15 se observa que la eficiencia máxima es de 0,85 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 16,89 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 12,66 °C, a las 11:00 del mediodia.

El 14 de Mayo, la radiación incide desde las 05:30 hasta las 17:00 alcanzando 590 W/m2 y disminuyen hasta los 40 W/m2 siendo valores despreciables porque los valores de Tsol-air son incluso menores que Tmin.

Dia: 15/05/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	45,79	14,31	20,79



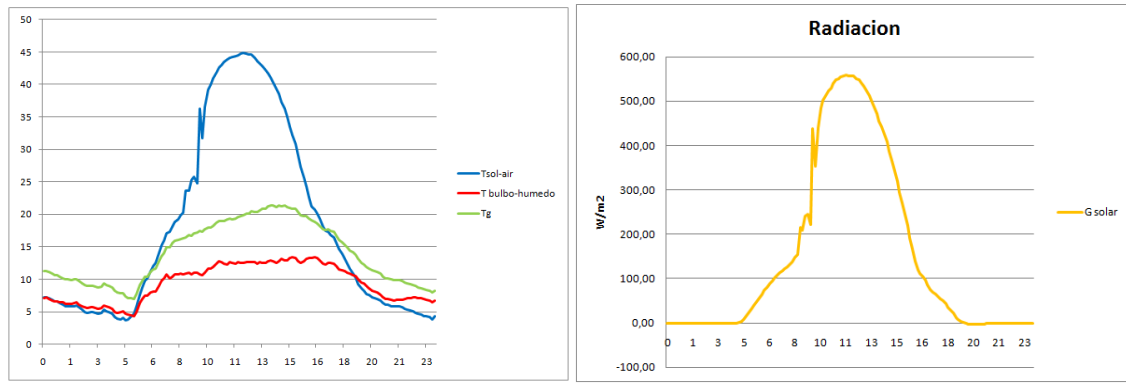
Grafica 3.4.16

$$\varepsilon = \frac{45,79 - 20,79}{45,79 - 14,31} = 0,79$$

La eficiencia es máxima cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 20,79 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 14,31 °C a lo largo del día 15 de Mayo. La línea roja y verde representan dichos valores y son muy semejantes durante todo el día y solo cuando la radiación incide de 05:30 a 18:00 son inferiores a la temperatura máxima, Tsol-air. La radiación alcanza valores de 550 W/m² y disminuyen a partir de las 18:00 en adelante siendo despreciables.

Dia: 16/05/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	44,81	12,53	19,89



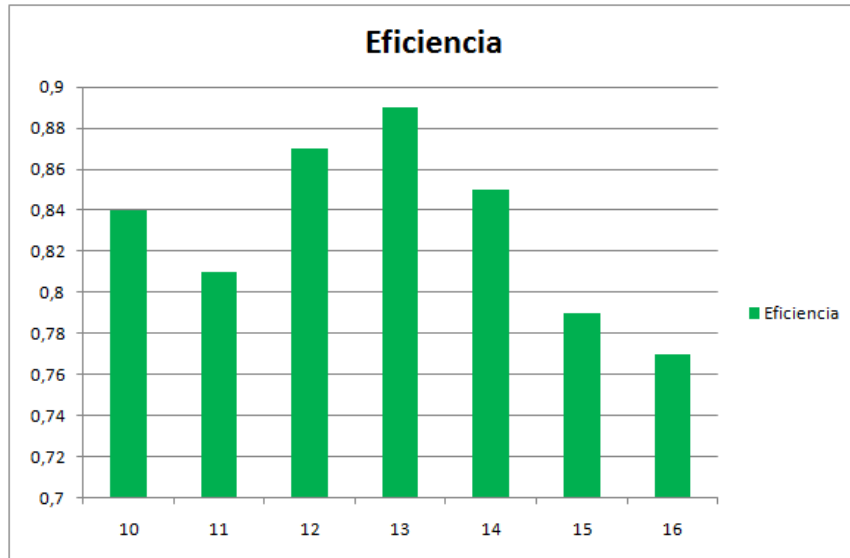
Grafica 3.4.17

$$\varepsilon = \frac{44,81 - 19,89}{44,81 - 12,53} = 0,77$$

En la grafica 3.4.17 se observa por una parte el grafico de eficiencia y por otro lado el de la radiación solar para el dia 16 de Mayo de 2014. La eficiencia maxima (0,77) en este caso, se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato representada con una línea verde (19,89 °C), se acerca a la temperatura de bulbo humedo (12,53 °C) línea roja.

En este caso, la radiación solar alcanzo un máximo de 560 W/m2 y minimo de 50 W/m2.

Despues de calcular las eficiencias en una semana de mayo se obtiene este grafico como modelo de la eficiencia en el caso propuesto: CASO 2 VERANO HUMEDO.



Grafica 3.4.18

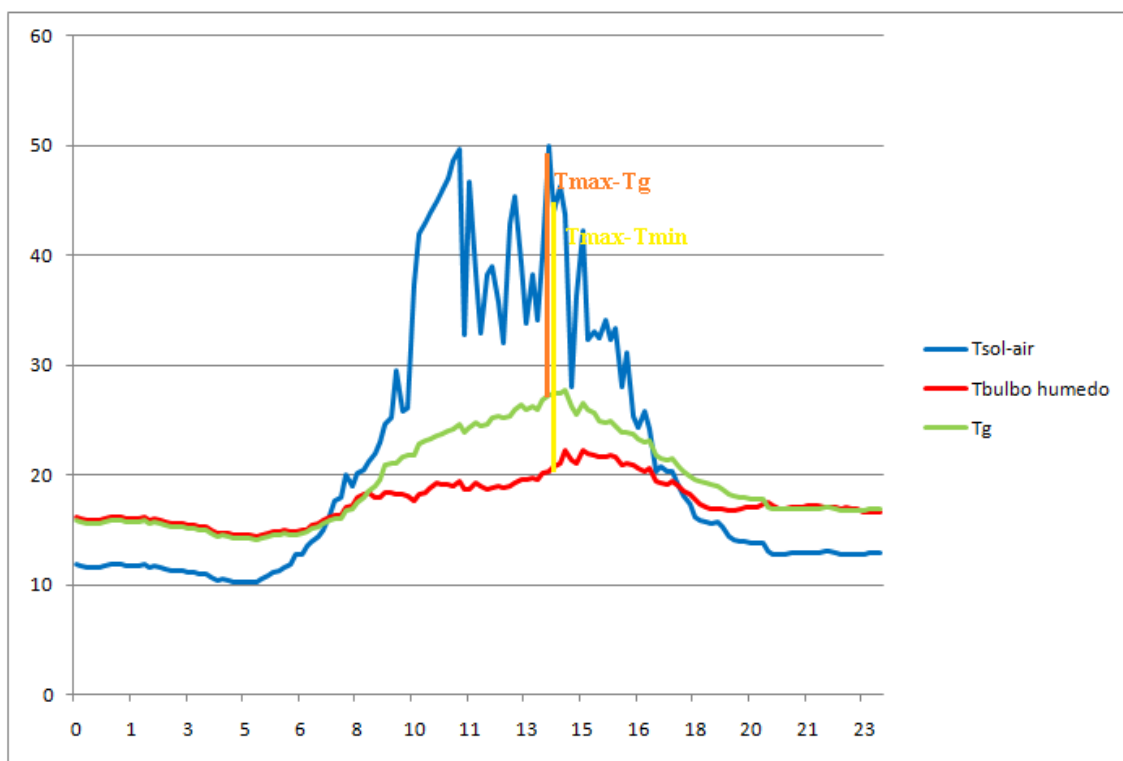
Para obtener un valor de la eficiencia desde el dia 10 de Mayo hasta el 16 de Mayo se han calculado las medias de eficiencia para cada uno de los días. Como se observa en la grafica, en días de verano humedo las eficiencias son menores que en invierno (ninguna pasa de 0,9 en verano húmedo, mientras que en invierno se alcanzaba un máximo de 0,99), puesto que la temperatura que hay en la capa externa es superior aunque el agua en la capa de sustrato y drenaje sea similar. Se puede decir, que aunque no se comporte de la misma manera que en invierno, la instalación de la fachada vegetal seria muy eficiente en esta época del año.

CASO 3: VERANO SECO

En este caso se han tomado los datos del día 3 de Agosto como referencia para estudiar el comportamiento de la fachada vegetal en días con temperaturas altas y ausencia de agua. Calculando los datos de temperatura máxima y del bulbo húmedo calculamos la eficiencia en dicho día.

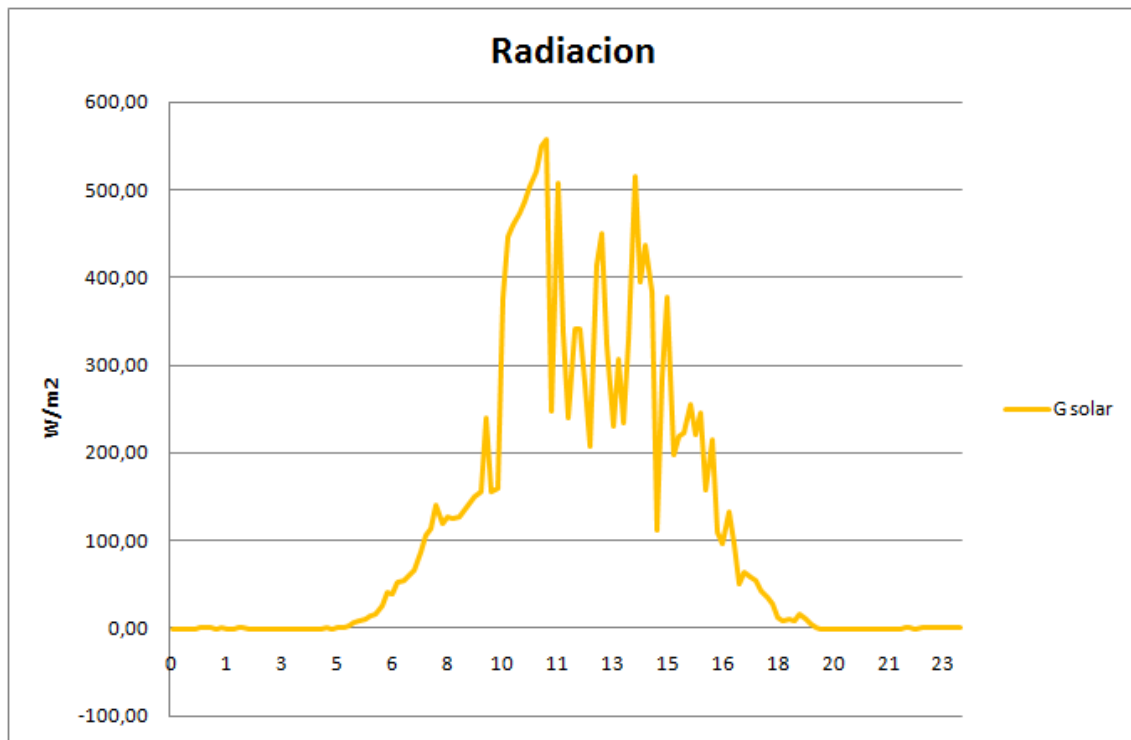
Día: 03/08/2014			
HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
14:00	50,03	20,25	27,25

$$\varepsilon = \frac{T_{max} - T_g}{T_{max} - T_{min}} \qquad \varepsilon = \frac{50,03 - 27,25}{50,03 - 20,25} = 0,76$$



Grafica 3.4.19

En la grafica 3.4.19 se observa que la eficiencia esta definida como el radio entre la vertical naranja ($T_{max}-T_g$) y la amarilla ($T_{max}-T_{min}$). La eficiencia máxima de 0,76, se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato ($T_g= 27,25$ °C) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo (20,25 °C), a las 14:00 del mediodia. Se aprecia un aumento de temperatura tanto en el exterior del sustrato como en el bulbo húmedo de 15 °C comparando con el invierno.

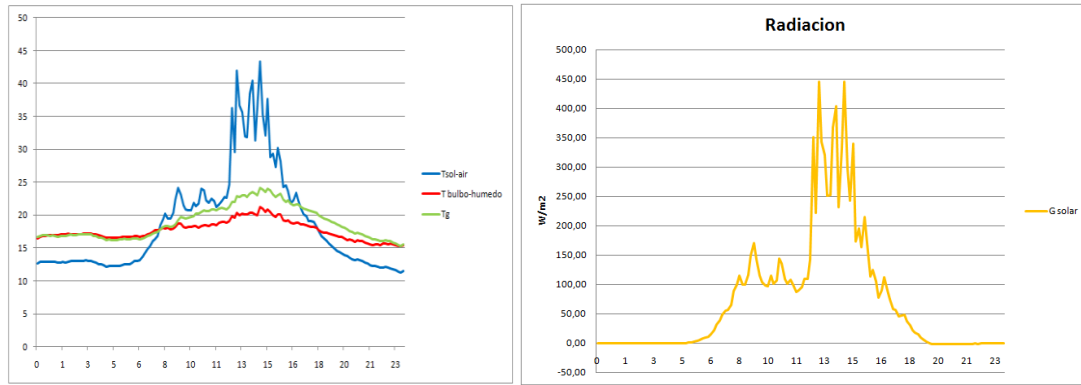


Grafica 3.4.20

Este caso es similar al estudiado anteriormente puesto que la luz del sol en verano es mas duradera que en invierno. A diferencia del verano húmedo es que los días muy nubosos son mas escasos y por eso las únicas horas que no se toman en cuenta son las nocturnas. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en verano seco se dara entre las horas con una radiación minima de 40 W/m². Como se observa en la grafica 3.4.20, el dia 3 de Agosto, se alcanza una radiación maxima de 560 W/m² y minima de 20 W/m².

A continuacion se reflejan los datos y resultados en la semana de Agosto:

Dia: 04/08/2014			
HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
13:00	41,99	20,32	22,83



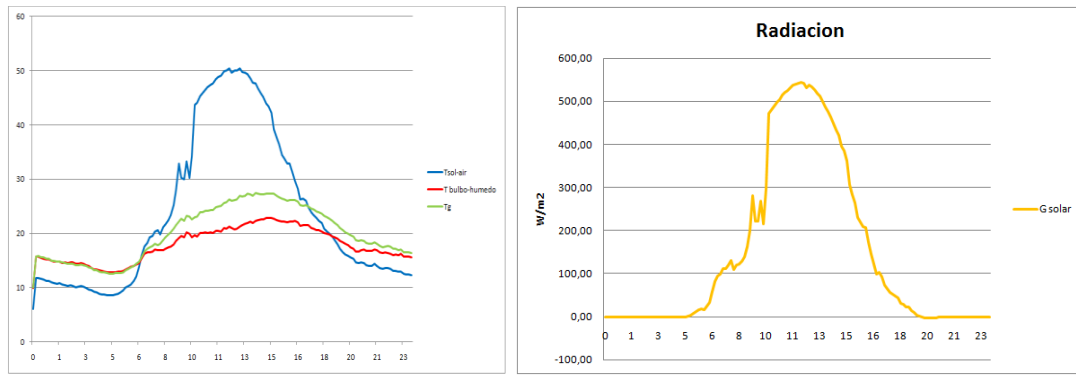
Grafica 3.4.21

$$\varepsilon = \frac{41,99 - 22,83}{41,99 - 20,32} = 0,88$$

En la grafica 3.4.21, se observa que la temperatura exterior del sustrato representada con una línea verde y la temperatura de bulbo húmedo (línea roja), tienen un valor mayor que la temperatura máxima salvo en las horas que incide la radiación solar, desde las 06:00 hasta las 18:00. En esa franja horaria, se alcanzan 450 W/m2 y a la 13:00 del mediodía la fachada vegetal presenta su eficiencia máxima de 0,88.

Dia: 05/08/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
14:00	50,43	21,25	26,29



Grafica 3.4.22

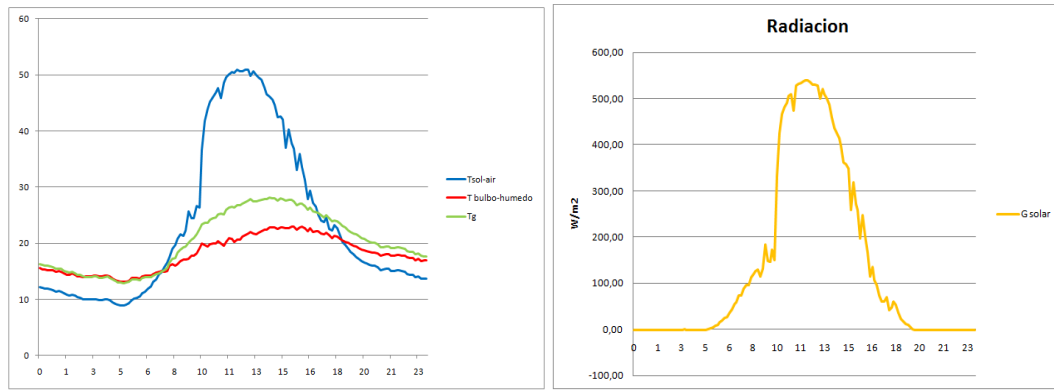
$$\varepsilon = \frac{50,43 - 26,29}{50,43 - 21,25} = 0,82$$

En la grafica 3.4.22 se observa que la eficiencia máxima es de 0,82 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 26,29 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 21,25 °C, a las 14:00 del mediodia.

Como se muestra en la grafica, el 5 de Agosto, la radiación solar incide desde las 05:30 hasta las 18:00 y se llega hasta un máximo de 530 W/m2 y un mínimo de 20 W/m2. En las horas nocturnas y al amanecer, en las que la radiación solar no incide, se desprecia el calculo de Tsol-air puesto que los valores resultantes son incluso menores que Tmin. Esta es la causa por la que el estudio de la eficiencia en verano seco, se dara entre las horas con una radiación mínima de 40 W/m2.

Dia: 06/08/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	50,96	21,68	27,53



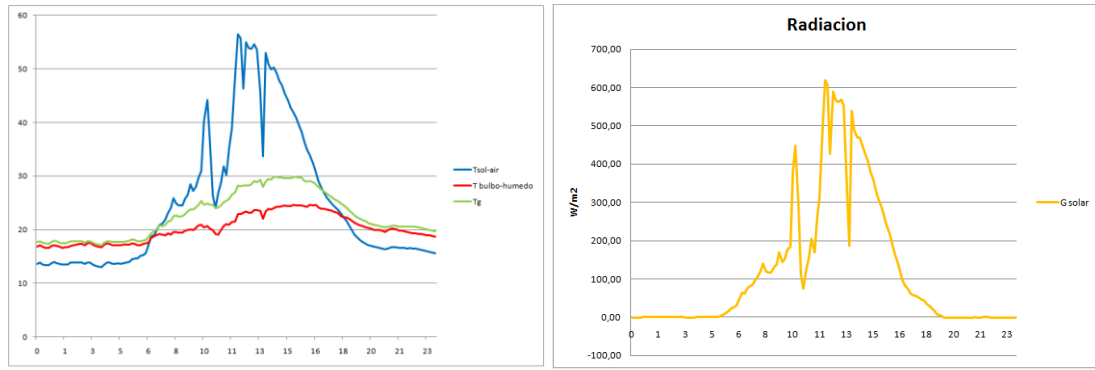
Grafica 3.4.23

$$\varepsilon = \frac{50,96 - 27,53}{50,96 - 21,68} = 0,79$$

En la grafica 3.4.23 se observa para el día 6 de Agosto, por una parte las temperaturas definidas anteriormente, y por otro lado la radiación. En las horas que la radiación apenas incide (de 18:00 a 05:30), los valores de la temperatura exterior del sustrato y temperatura de bulbo húmedo son incluso mayores que la temperatura máxima, T sol-air, siendo el valor minimo de radiación de 30 W/m². A las 12:00 la eficiencia es maxima con un valor de 0,79, siendo la temperatura exterior del sustrato 27,53 °C y la del bulbo húmedo 21,68 °C.

Dia: 07/08/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	56,43	22,88	28,20



Grafica 3.4.24

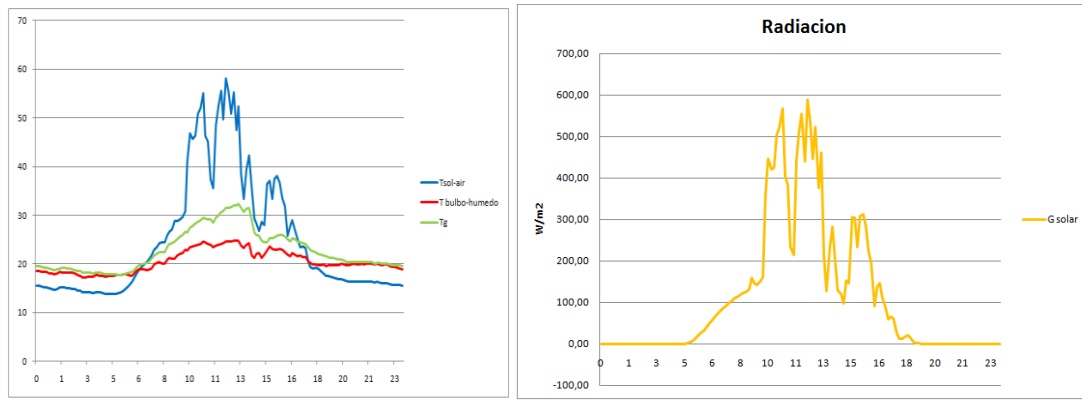
$$\varepsilon = \frac{56,43 - 28,20}{56,43 - 22,88} = 0,83$$

En la grafica 3.4.24 se observa que la eficiencia máxima es de 0,83 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 28,20 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 22,88 °C, a las 12:00 del mediodia.

En la grafica de la radiación del 7 de Agosto se aprecia como la incidencia solar abarca desde las 05:30 hasta las 18:00 alcanzando los 610 W/m². A partir de las 18:00 se observa que la radiación disminuye considerablemente hasta los 20 W/m² lo cual se va a despreciar para el estudio de la eficiencia como bien se ha comentado anteriormente.

Dia: 08/08/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
12:00	58,09	24,65	31,50



Grafica 3.4.25

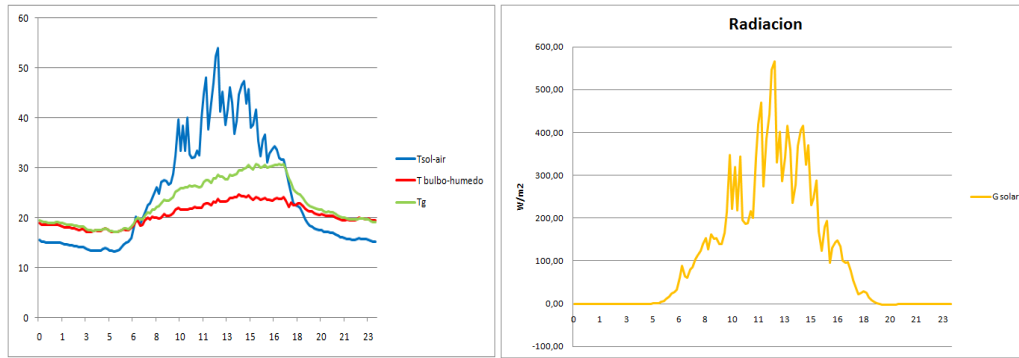
$$\varepsilon = \frac{58,09 - 31,50}{58,09 - 24,65} = 0,78$$

En la grafica 3.4.25 se observa que la eficiencia máxima es de 0,78 y se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato 31,50 °C (Tg) se acerca a la temperatura de bulbo húmedo 24,65 °C, a las 12:00 del mediodía.

El 8 de Agosto, la radiación incide desde las 05:30 hasta las 17:00 alcanzando 590 W/m² y disminuyen hasta los 10 W/m² siendo valores despreciables porque los valores de Tsol-air son incluso menores que Tmin en ese rango.

Dia: 09/08/2014

HORA	T Sol-air	T Bulbo-humedo	Tg
14:00	53,96	23,77	28,54



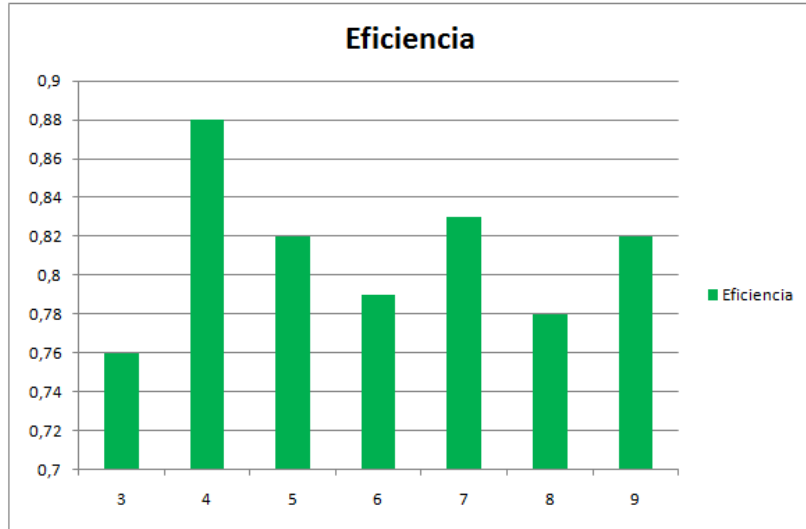
Grafica 3.4.26

$$\varepsilon = \frac{53,96 - 28,54}{53,96 - 23,77} = 0,82$$

En la grafica 3.4.26 se observa por una parte el grafico de eficiencia y por otro lado el de la radiación solar para el dia 9 de Agosto de 2014. La eficiencia máxima (0,82) en este caso, se alcanza cuando la temperatura de la capa externa del sustrato representada con una línea verde (19,89 °C), se acerca a la temperatura de bulbo humedo (12,53 °C) línea roja.

En este caso, la radiación solar alcanzo un máximo de 570 W/m2 y minimo de 20 W/m2.

Despues de calcular las eficiencias en una semana de Agosto se obtiene este grafico como modelo de la eficiencia en el caso propuesto: CASO 3 VERANO SECO.



Grafica 3.4.27

Para obtener un valor de la eficiencia desde el dia 3 de Agosto hasta el 9 de Agosto se han calculado las medias de eficiencia para cada uno de los días. Como se observa en la grafica, en días de verano seco las eficiencias son menores (los valores de eficiencia en verano seco incluso están por debajo de 0,8) puesto que el agua en la capa de sustrato y drenaje es menor que en otras épocas y además la temperatura que hay en la capa externa es superior. Se exceptua el dia 4 puesto que llovió y la humedad aumento y la temperatura exterior disminuyo. Las eficiencias en esta época del año son claramente inferiores a las de invierno, pero aun asi el resultado a sido bastante bueno.

4 CONCLUSIONES

Los resultados que se obtienen mediante esta metodología son comparables a las condiciones reales de un edificio bajo condiciones reales de ensayo de altos estándares de calidad. Este hecho es decisivo cuando se tienen que determinar las incertidumbres de los parámetros identificados para la realización de los modelos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos de la fachada vegetal propuesta:

CONDICION	DIA	EFICIENCIA	PROMEDIO
INVIERNO	16/01/2014	0,93	0,957
	17/01/2014	0,9	
	18/01/2014	0,95	
	19/01/2014	0,99	
	20/01/2014	0,99	
	21/01/2014	0,99	
	22/01/2014	0,95	
VERANO HUMEDO	10/05/2014	0,84	0,831
	11/05/2014	0,81	
	12/05/2014	0,87	
	13/05/2014	0,89	
	14/05/2014	0,85	
	15/05/2014	0,79	
	16/05/2014	0,77	
VERANO SECO	03/08/2014	0,76	0,81
	04/08/2014	0,88	
	05/08/2014	0,82	
	06/08/2014	0,79	
	07/08/2014	0,83	
	08/08/2014	0,78	
	09/08/2014	0,82	

Dependiendo la época del año se observa la disminución de la eficiencia. Como bien se ha dicho la temperatura a la que se encuentra la capa externa de la fachada vegetal es importante, ya que esta es la temperatura afectada por el sol y el proceso de evapotranspiración de las plantas y es la que definirá las demandas de calefacción y refrigeración. La temperatura dada en la capa exterior del sustrato en invierno y en

verano (15 °C de diferencia) es uno de los factores por el cual la eficiencia en invierno es mayor. Además, en invierno la humedad afecta muy positivamente a la fachada vegetal, por ello se propone el sistema de fertirriego en verano para conseguir resultados parejos en ese aspecto.

El efecto del sistema de fertirriego utilizado en sistemas modulares de fachada vegetal parece ser fundamental en caso de querer reducir las demandas de refrigeración durante el verano. Las bajas temperaturas que se registran en la superficie exterior de la fachada vegetal, debidas a la humedad del sustrato, permiten que haya un flujo de energía saliente durante el día y que este flujo sea superior al flujo de calor entrante.

Se concluye que la fachada vegetal presenta unos mejores resultados durante el periodo de invierno, en donde los valores de la eficiencia varían alcanzan el 0,99. Además, se manifiesta la diferencia relevante entre los dos escenarios de verano. Evidenciando que resulta clave el contenido de agua, en las plantas y en el sustrato, para lograr un beneficio mayor. Por el contrario, parece evidente que, en lo referente a la transferencia de calor entre el exterior y el edificio, la fachada vegetal tendrá muy poca relevancia en invierno. Aun así, en la época de verano seco como en verano húmedo, los resultados de la eficiencia han sido muy positivos. Por ello, este estudio, presenta estos cambios en la Universidad del País Vasco como mejora a la fachada convencional que dispone.

5 BIBLIOGRAFIA

- [1] S.D. Eurostat, Energy statistics - Supply, transformation, consumption (2010).
- [2] Spanish National Statistics Institute, Spanish National Statistics Institute, (2013).
- [3] The R Core Team, A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria, 2012.
- [4] R. Petela, An approach to the exergy analysis of photosynthesis, *Solar Energy*. 82 (2008) 311-328.
- [5] C. Feng, Q. Meng, Y. Zhang, Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, *Energy Build.* 42 (2010) 959-965.
- [6] E. Eumorfopoulou, D. Aravantinos, The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece, *Energy Build.* 27 (1998) 29-36.
- [7] D.I. Cook, D.F. Van Haverbeke, Suburban noise control with plant materials and solid barriers, NE: University of Nebraska, College of Agriculture, Agricultural Experiment Station (1997) 234-241.
- [8] G. Grant, L. Engleback, B. Nicholson, Green Roofs: their existing status and potential for conserving biodiversity in urban areas., EcoSchemes Ltd in association with StudioEngleback. ed., Environmental Impacts Team. English Nature Research, London, 2003.
- [9] T. Van Renterghem, D. Botteldooren, K. Verheyen, Road traffic noise shielding by vegetation belts of limited depth, *J. Sound Vibrat.* 331 (2012) 2404-2425.
- [10] Millenium ecosystem assessment. Strengthening capacity to manage ecosystems sustainably for human well-being (2014).
- [11] C.S.B. Grimmond, H.A. Cleugh, T.R. Oke, An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes, *Atmospheric Environment. Part B, Urban Atmosphere.* 25 (1991) 311-326.
- [12] H. Sukopp, Human-caused impact on preserved vegetation, *Landscape Urban Plann.* 68 (2004) 347-355.
- [13] N. Beckstead, How much could refuges help us recover from a global catastrophe?, *Futures*.
- [14] G. Grant, Extensive green roofs in London., *Urban Habitats.* 4 (2006) 51-65.
- [15] P. Næss, Residential location affects travel behavior—but how and why? The case of Copenhagen metropolitan area, *Progress in Planning.* 63 (2005) 167-257.

- [16] M. Clark, The Compact City: European Ideal, Global Fix or Myth?, *Global Built Environment Review*. 4 (2005) 1-11.
- [17] J. Ahern, S. Cilliers, J. Niemelä, The concept of ecosystem services in adaptive urban planning and design: A framework for supporting innovation, *Landscape Urban Plann.* 125 (2014) 254-259.
- [18] E.V. White, B. Gatersleben, Greenery on residential buildings: Does it affect preferences and perceptions of beauty?, *J. Environ. Psychol.* 31 (2011) 89-98.
- [19] B. William, E.F. Connelly, M. Fraser Cook, J. Goldstein, J. Pauly, *The Costs and Benefits of Green Affordable Housing.*, New Ecology, Boston, 2005.
- [20] M.S.F. Rosley, S.R.A. Rahman, H. Lamit, Biophilia Theory Revisited: Experts and Non-experts Perception on Aesthetic Quality of Ecological Landscape, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 153 (2014) 349-362.
- [21] Government of Western Australia. *Graffiti Prevention*. 2015 (2015).
- [22] A.E. van den Berg, J. Maas, R.A. Verheij, P.P. Groenewegen, Green space as a buffer between stressful life events and health, *Social Science and Medicine*. 70 (2010) 1203-1210.
- [23] V. Tsilini, S. Papantoniou, D. Kolokotsa, E. Maria, Urban gardens as a solution to energy poverty and urban heat island, *Sustainable Cities and Society*. 14 (2015) 323-333.
- [24] P.A. Mirzaei, F. Haghghat, Approaches to study Urban Heat Island – Abilities and limitations, *Build. Environ.* 45 (2010) 2192-2201.
- [25] E.J. Gago, J. Roldan, R. Pacheco-Torres, J. Ordóñez, The city and urban heat islands: A review of strategies to mitigate adverse effects, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 25 (2013) 749-758.
- [26] J.K.W. Wong, L.S. Lau, From the ‘urban heat island’ to the ‘green island’? A preliminary investigation into the potential of retrofitting green roofs in Mongkok district of Hong Kong, *Habitat International*. 39 (2013) 25-35.
- [27] S. Parizotto, R. Lamberts, Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil, *Energy Build.* 43 (2011) 1712-1722.
- [28] E. Alexandri, P. Jones, Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, *Build. Environ.* 43 (2008) 480-493.
- [29] W. Yang, D. Li, T. Sun, G. Ni, Saturation-excess and infiltration-excess runoff on green roofs, *Ecol. Eng.* 74 (2015) 327-336.

- [30] E. Schroll, J. Lambrinos, T. Righetti, D. Sandrock, The role of vegetation in regulating stormwater runoff from green roofs in a winter rainfall climate, *Ecol. Eng.* 37 (2011) 595-600.
- [31] A. Hoyano, Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building, *Energy Build.* 11 (1988) 181-199.
- [32] G. Hoek, G. Kos, R. Harrison, J. de Hartog, K. Meliefste, H. ten Brink, K. Katsouyanni, A. Karakatsani, M. Lianou, A. Kotronarou, I. Kavouras, J. Pekkanen, M. Vallius, M. Kulmala, A. Puustinen, S. Thomas, C. Meddings, J. Ayres, J. van Wijnen, K. Hameri, Indoor-outdoor relationships of particle number and mass in four European cities, *Atmos. Environ.* 42 (2008) 156-169.
- [33] L.J. Whittinghill, D.B. Rowe, R. Schutzki, B.M. Cregg, Quantifying carbon sequestration of various green roof and ornamental landscape systems, *Landscape Urban Plann.* 123 (2014) 41-48.
- [34] World Health Organization. *The World Health Report 2002: Reducing risks, Promoting Healthy Life.* 2004.