

# LA CUBIERTA ECOLÓGICA COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN

(THE ECOLOGICAL ROOF AS MATERIAL OF CONSTRUCTION)

María Machado\*, Celina Brito\*\*, Javier Neila\*\*

(\*) Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura. Univ. del Zulia, VENEZUELA

(\*\*) Dpto. de Construcción y Tecnología Arquitectónica. E. T. S. de Arquitectura. U. P. M., ESPAÑA

Fecha de recepción: 6-X-99

886-43

## RESUMEN

*La cubierta ecológica es un tipo de cubierta vegetal con un substrato de poco espesor y una capa vegetal con plantas de bajo porte. Las ventajas de este tipo de cubierta, abarcan aspectos arquitectónicos, constructivos, medioambientales y estéticos.*

*Para realizar estudios a través de modelos de ordenador con cubiertas ecológicas, primero se determinó el valor de conductividad térmica equivalente del substrato y capa vegetal, utilizando las ecuaciones de balance térmico, lo cual fue comprobado con un ensayo de laboratorio y, con estos resultados, se realizaron simulaciones térmicas en los espacios con cubiertas ecológicas comparándolos con sistemas constructivos de cubiertas utilizados en las dos zonas de estudio: Maracaibo y Madrid. Para el estudio se establecieron cinco alternativas de cubiertas, analizándose de cuatro maneras diferentes: 1) cerrada durante las 24 horas; 2) cerrada durante el día y abierta en la noche; 3) abierta las 24 horas; 4) abierta durante el día y cerrada en la noche. La herramienta utilizada para el estudio fue el Cálculo de Evolución de Temperaturas Interiores, desarrollada por Javier Neila.*

*Los resultados obtenidos muestran que la cubierta ecológica disminuye la transferencia de calor en épocas calurosas, ya que actúa como aislamiento exterior.*

**Palabras clave:** *Cubierta ecológica, conductividad térmica, simulación térmica, coeficiente de estabilidad térmica, confort térmico.*

## SUMMARY

*The ecological roof is one with a cover of vegetation with a thin substratum and a layer of low level plants. This type of roof has many advantages including architectural, construction, environmental and aesthetic advantages.*

*In order to determine the thermal behaviour of models with ecological roofs, simulations were performed on these and other types of construction in the two areas involved in the study: Maracaibo and Madrid. Five different roofs were created for the study, analysed in four ways: 1) with the building windows closed throughout the whole 24 hours; 2) with the windows closed during the day and open at night; 3) open 24 hours; 4) open during the day and closed at night. The simulation tool used in the study was the "Method of Interior Temperature Evolution Calculation" developed by Javier Neila.*

*The results obtained show that the ecological roof reduces the heat transference in hot seasons, acting as exterior insulation, and preventing heat loss by radiation into space in winter.*

**Key words:** *Ecological roof, thermal conductivity, thermal simulation, stability thermal coefficient, and thermal comfort*

## Introducción

Los elementos que constituyen el clima exterior, radiación solar y temperatura, humedad y movimiento del aire, influyen en el intercambio térmico del edificio a través de su envolvente. Esto ocasiona que durante el invierno sea necesario minimizar las pérdidas térmicas a través de los cerramientos, debiendo, en el verano, evitarse el sobrecalentamiento.

El ambiente interior es el resultado de los flujos energéticos que se establecen como consecuencia del clima y de las cargas internas del edificio. El edificio está sujeto a pérdidas y ganancias térmicas a través de sus cerramientos. Es la envolvente la responsable de mantener los niveles de temperatura y humedad estables y dentro de los márgenes admisibles por el cuerpo humano. Son numerosos los autores que han determinado zonas de bienestar térmico para el verano o climas cálidos: Koenigsberger (1), Olgyay (2), ASHRAE (3), Givoni (4), Yaglou-Drinker, Brooks, Serrá (5), definen las zonas de bienestar con límites inferiores que oscilan entre los 18 °C y los 23 °C y los superiores están localizados entre los 23 °C y los 29,5 °C, mientras que los valores de humedad relativa se encuentran entre el 20% y el 75%. En invierno: Serrá (5), IT. IC (6), ASHRAE (3), establecen la zona de bienestar térmico entre los 18°C (límite inferior) y de 22 °C a 24 °C (límite superior), ubicando la humedad relativa entre el 30% y 60 %.

Utilizando los valores altos de la inercia térmica permiten conseguir uno de los objetivos más deseables en un edificio: la estabilidad térmica. El objetivo, deseable desde el punto de vista del bienestar, es que la temperatura fluctúe sólo levemente y siempre dentro de los márgenes del bienestar, y todo ello sin consumos excesivos de energía convencional. Para poder cuantificar las distintas soluciones a la luz de este fenómeno, la estabilidad térmica se mide con un coeficiente que relaciona la amplitud de la temperatura exterior (temperatura máxima menos temperatura mínima) con la amplitud de la temperatura exterior. Los valores próximos a uno quieren decir que el local no tiene inercia térmica y que cualquier alteración energética (exterior o interior) se nota inmediatamente en el ambiente interior, mientras que los valores pequeños, por debajo del 0,5 nos hablan de edificios muy estables y, por tanto, poco dispuestos a cambiar de temperatura (7).

La cobertura es la parte del edificio que está sujeta a las mayores fluctuaciones térmicas: durante el día alcanza elevadas temperaturas por su exposición directa a la radiación del sol y, durante la noche, es la parte de la construcción que más calor pierde, por radiación, hacia la bóveda celeste. Su aislamiento se impone como una medida de prioridad y puede solucionar parte del problema pero la absorción de la radiación solar por la cubierta, con su consecuente transferencia de calor a sus elementos

constituyentes puede originar fácilmente temperaturas muy altas.

Muchos sistemas de cubierta fueron desarrollados en base a estas preocupaciones, casi siempre intentando minimizar los flujos energéticos entre el ambiente interior y exterior a través de la cubierta y, por supuesto, cumpliendo con los requisitos esenciales a que debe responder una cubierta: la estabilidad y resistencia mecánica, la seguridad en caso de incendio, la salubridad, la seguridad de uso, la protección contra el ruido, el ahorro de energía y la protección térmica. Es entonces, cuando la cubierta ajardinada surgió como una respuesta eficiente a éstos y otros requisitos, con comprobadas ventajas sobre otros tipos de cubierta.

El principal objetivo de este proyecto es determinar y comparar los valores de temperatura, humedad relativa, el porcentaje de personas satisfechas, el coeficiente de estabilidad térmica, las pérdidas y las ganancias de calor en edificios que utilicen cubierta ecológica, con respecto a otros tipos de coberturas.

## La cubierta ecológica

La *cubierta ajardinada* es un tipo de cubierta invertida con la adición de un sustrato orgánico y plantas por la capa superior. La cubierta ajardinada puede ser extensiva o intensiva. La *cubierta ecológica* o extensiva tiene una capa vegetal de pocos centímetros de espesor (normalmente menor de 10 cm), con plantas de bajo porte (generalmente autóctonas), con abastecimiento de agua y sustancias nutritivas por procesos naturales. La *cubierta ajardinada intensiva*, o cubierta jardín, tiene un sustrato de mayor espesor (más de 20 cm), plantas árboles y arbustos de mayor altura y mantenimiento típico de cualquier jardín.

La cubierta ajardinada surgió como una respuesta eficiente a estos y otros requisitos, con comprobadas ventajas sobre otros tipos de cubierta (Figura 1).

En general las cubiertas ecológicas son montadas sobre las cubiertas planas. Y constan principalmente de los siguientes componentes:

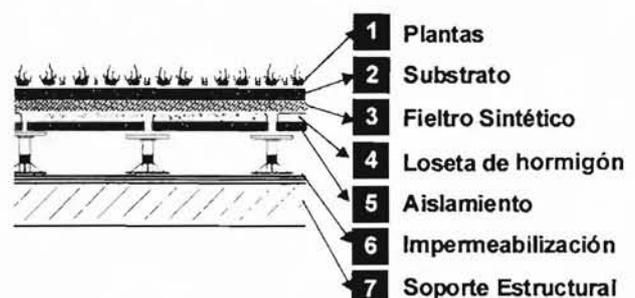


Figura 1.- Componentes de la cubierta ecológica.

- . Una capa vegetal con especies autóctonas y de mantenimiento nulo.
- . Un sustrato orgánico o inorgánico de poco espesor, bajo peso y nutrientes suficientes para el desarrollo vegetativo de las especies.
- . Retenedor de agua en forma de gel, paneles sintéticos o paneles de lana de roca.
- . Bajo el sustrato un fieltro sintético para la retención de las partículas finas del sustrato.
- . Aislamiento térmico opcional dependiendo de las condiciones climáticas del lugar.
- . Una lámina de impermeabilización, generalmente antirraíz.
- . Soporte estructural.

La elección de las *especies vegetales* que mejor pueden adaptarse a una azotea está sujeta a importantes condicionantes impuestos por el clima, sustrato, estructura de la cubierta y el efecto que se quiera conseguir. El principal condicionante es que las cubiertas ecológicas no constituyen un jardín que precisaría de una capa de tierra, riego y mantenimiento. El objetivo principal es el de encontrar una especie vegetal que tapice una superficie sin cuidado de ninguna clase y que su supervivencia contribuya a una mejora en la calidad medio ambiental, que puedan desarrollarse en pocos centímetros de suelo. Las características para este tipo de vegetación se enumeran a continuación:

- . Capacidad para soportar temperaturas extremas.
- . Capacidad para soportar grandes períodos sin aportación de agua, por lo cual no deben utilizarse hojas planas, lo que nos indica una escasa resistencia a la sequía del verano, mientras que las hojas más globosas pueden resistir grandes períodos de sequía.
- . Desarrollo en la superficie, con suficiente capacidad de crecimiento horizontal para tapizar la cubierta
- . Capacidad de crecer en suelos pocos profundos.

Para la elección del tipo de sustrato debe tenerse en cuenta, un mantenimiento prácticamente nulo, razón por la cual se seleccionaron sustratos capaces de retener grandes cantidades de agua para que la planta pueda disponer de ésta durante los grandes períodos de sequía.

Entre los sustratos se distinguen el *sustrato orgánico*, que puede ser un sustrato elaborado a partir de las materias vegetales procedentes de la vid que, además, está incluido en la categoría de compost. El compostaje es un método de fermentación en presencia del aire que provoca la degradación biológica de la materia prima transformándola en materia orgánica. La aplicación de este compost como abono permite devolver a la tierra parte de la materia que se obtuvo con la vendimia. De esta forma se realiza un aprovechamiento de carbono, nitrógeno, fósforo y potasio,

elementos claves del crecimiento vegetativo. Este abono orgánico no contiene elementos tóxicos, ya que la materia procede del mismo proceso en el que se obtiene el vino.

El *sustrato inorgánico* de arcilla expandida, se obtiene a partir de un proceso de cocción al que se someten las arcillas especiales. Mediante este tratamiento se consiguen unos gránulos esféricos porosos y ligeros, con una superficie resistente y un interior formado por burbujas de aire que proporciona al material ligereza y disminución de la resistencia al paso del flujo de calor a través de él. Su finalidad es la de proteger al sustrato orgánico de las heladas y la contaminación, mantener el sustrato sin oscilaciones bruscas de temperatura y evitar que bajo los efectos de la lluvia se formen capas apelmazadas.

### Beneficios de la cubierta ajardinada

A continuación se enumeran ventajas de la cubierta ajardinada, que abarcan tanto aspectos arquitectónicos-construtivos como estéticos y medio ambientales:

- . Actuación positiva en el clima de la ciudad y la región proporcionada por la retención de polvo y sustancias contaminantes. Las plantas llegan a filtrar hasta el 85% de las partículas del aire, produciendo oxígeno.
- . Aumento del espacio útil. Con la instalación de una cubierta ecológica, se aumentaría la superficie verde de las ciudades que es uno de los problemas urbanos a tener en cuenta y se podría, de alguna manera, reponer la superficie verde ocupada por la construcción del edificio.
- . Protección de la radiación solar. Las características físicas del follaje de las plantas, como: la textura, la densidad, y la altura de las plantas que impiden la penetración de la radiación solar a la superficie de la cubierta. Y, en la medida que se protege el punto más vulnerable del edificio, que es la cubierta, se minimizan los flujos energéticos entre el ambiente exterior e interior.
- . Aumenta de varias maneras la eficacia térmica de la cubierta, gracias al aislamiento proporcionado por el aire encerrado dentro del follaje y los procesos de refrigeración propios de las especies vegetales.
- . Enfriamiento de los espacios bajo cubierta, en el verano provocado por dos tipos de evaporación: en primer lugar la evaporación provocada por la humedad retenida en el sustrato en contacto con la radiación solar y, en segundo lugar, por la evaporación a través de las plantas en sus funciones biológicas. La evaporación consume energía que es alejada antes de transmitirse por la cubierta.
- . Disminución de las pérdidas de calor, en el invierno, lo que presupone un ahorro de energía, con la finalidad de estabilizar las condiciones internas de bienestar térmico, obtenidas por ganancias pasivas o por sistemas de acondicionamiento, requiriendo consumos más reducidos para alcanzar los niveles de confort estipulados.

. Aumento del aislamiento térmico. La diferencia de temperatura que sufren los materiales que conforman una cubierta quedan minimizados con el empleo de una capa vegetal. La capa protectora constituida por la vegetación, el poder aislante del sustrato orgánico, generalmente de baja conductividad térmica, el aire existente entre las hojas de las plantas y la capa superior del sustrato que funcionan como una capa aislante, disminuyendo el intercambio térmico entre la cubierta y el exterior.

. La absorción del ruido. En las ciudades se está bajo la influencia de toda clase de ruidos provenientes de las actividades de la ciudad. En la cubierta tradicional, los materiales tienen un poder de reflexión que expanden la onda sonora, sin embargo, tanto las plantas como el sustrato absorben parte de la onda.

. Prolongación del tiempo de vida de la cubierta, al proteger la lámina impermeabilizante de la radiación solar y de los cambios bruscos de temperatura.

. Reduce la carga de agua que soportan las canalizaciones de agua, disminuyendo los costes de depuración de aguas residuales y minimiza los riesgos de inundación y torrentes. Devuelve el agua de lluvia al ciclo natural. Incrementando las ventajas financieras para las ciudades que tienen costosos sistemas de drenaje y ayudando a la evacuación de aguas de lluvia a las ciudades que carecen de él (9).

. Reduce el efecto de la isla de calor. Durante el verano la evaporación del agua puede producir grandes efectos refrigerantes dentro de las ciudades. Grandes superficies verdes dentro de centros urbanos densos son indispensables para prevenir las sensaciones de incomfortabilidad y despilfarro de energía que genera la isla de calor.

. Desafortunadamente, las superficies verdes en los centros urbanos desaparecen por el crecimiento urbano y, como consecuencia, aparecen las cubiertas ajardinadas.

. Mejora la calidad de las corrientes de aire, ya que el proceso de evapotranspiración que se sucede en las plantas, logran disminuir las temperaturas de las capas de aire de aire próximas a ellas. En el caso de las cubiertas con plantas de bajo porte, se ejerce una menor acción sobre las corrientes de aire, sin embargo disminuye la temperatura superficial comparada con otros acabados constructivos. Es en cubiertas ajardinadas con arbustos y árboles donde las incidencias son mayores.

. Desde el punto de vista social y psicológico, según Givoni (10), las áreas verdes (parques, jardines, terrazas, etc.) en espacios urbanos presentan una serie de beneficios que también los tienen la implantación de cubiertas ajardinadas, pero en menor escala: lugar de esparcimiento, de encuentro, enriquecimiento visual.

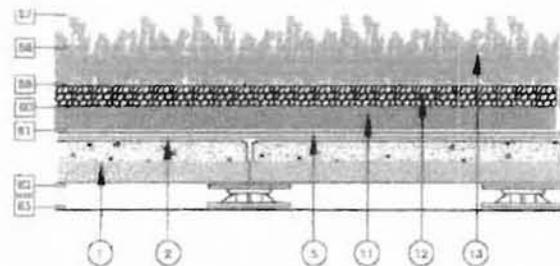
### La experimentación en Madrid

El trabajo experimental llevado a cabo por un grupo de empresas privadas (UTE) y la Universidad Politécnica de

Madrid, consiste en el estudio de cubiertas ecológicas, situadas sobre el edificio de Fitotécnica en el campo de prácticas de esta universidad (Figura 2) y la otra sobre el edificio de la ETSIA.

Los datos climatológicos, temperatura del aire, radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento son tomados a través de una estación meteorológica localizada junto a las parcelas de investigación. Fueron colocados sensores de temperatura en cada nivel que compone cada parcela, y estos datos, que son tomados minuto a minuto, son enviados a través de Internet, lo que permite un acceso en tiempo real a los datos, así como una base de datos amplia y objetiva (11).

Para el cálculo de la conductividad térmica equivalente se han utilizado los datos procedentes de la parcela experimental número 8, localizada sobre el forjado original del edificio de la ETSIA. Esta cubierta ecológica está ubicada en una parcela de 8,6 m<sup>2</sup> (2 x 4,3 m), y está compuesta por: una capa de plantas, con 10 cm de altura; 8 cm de sustrato, compuesto por corteza de pinos mezclada con lodos compostados y un gel retenedor de agua protegidos en la parte superior por un árido artificial; un fieltro de poliéster y una membrana impermeabilizante de PVC. Una placa de hormigón aligerado por la parte superior y poliestireno extruido por la parte inferior funciona como soporte del sustrato. Las condiciones del espacio interior se simulan dentro de una cámara de aire de 10 cm de espesor, situada sobre el forjado del edificio.



#### SENSORES

- 57 EN COTA +20 ENTRE LAS PLANTAS
- 58 EN COTA +10 ENTRE LAS PLANTAS
- 57 EN COTA +0 SOBRE ÁRIDO LIGERO
- 60 EN COTA +4 SOBRE LA CORTEZA DE PINO CON LODOS COMPOSTADOS MEZCLADOS CON GEL RETENEDOR DE AGUA
- 61 EN COTA -8 SOBRE LA MEMBRANA DRAYFIL
- 62 EN COTA -16 EN LA PARTE SUPERIOR DE LA CÁMARA DE AIRE
- 63 EN COTA -20 EN LA PARTE INFERIOR DE LA CÁMARA DE AIRE

#### MATERIALES

- 1 LOSA FILTRÓN
- 2 FIELTRO SINTÉTICO
- 5 MEMBRANA DRAIFIL DE AISCONDEL
- 11 SUSTRATO DE CORTEZA DE PINO CON LODOS COMPOSTADOS MEZCLADOS CON GEL
- 12 ÁRIDO LIGERO
- 13 PLANTAS SEDUM

Figura 2.- Cubierta ecológica de la parcela 8 del Edificio de Fitotécnica.

Para el cálculo del flujo del calor, a través de la cubierta ecológica, no existe el valor de la conductividad térmica de la capa vegetal y el substrato; lo que trae como consecuencia un cúmulo de dificultades en el cálculo del flujo de calor a través de esta cubierta y diferencias entre los valores reales y los obtenidos a través de simulaciones.

### Cálculo de la conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica

Para realizar los análisis sobre el comportamiento térmico de modelos a través del ordenador y comprobar los datos obtenidos en una experimentación, es necesario tener a disposición los valores de las características térmicas de los materiales, tales como la conductividad térmica, absorción, emisividad, etc.

El valor de la conductividad térmica para los materiales inertes, se obtiene a través de ensayos de laboratorio con equipos que utilizan dos polos eléctricos para determinarla. En el caso de una superficie o material activo, como es la cubierta vegetal, deben considerarse las interacciones entre ésta y los factores del medio ambiente que la rodea, como temperatura, humedad, radiación solar, precipitación, evapotranspiración, fotosíntesis, etc.

La búsqueda del valor de la conductividad equivalente condujo hacia la formulación de tres ecuaciones, utilizando los datos provenientes de las muestras de la parcela 8 del edificio de la ETSIA – UPM.

La **primera formulación** se obtuvo comparando la resistencia térmica de los materiales que componen la cubierta con capa vegetal más el substrato y la cubierta sin capa vegetal y la diferencia de temperatura existente entre la capa exterior e interior. Esta fórmula arrojó resultados diferentes para las distintas horas del día, ya que dependían de la variación de la diferencia de temperaturas.

$$R_{sv}/(T_e - T_i) = R_{cv}/(T_e - T_i) \quad (1)$$

$$R_{cv} = [R_{sv} (T_e - T_i)] / (T_e - T_i) \quad (2)$$

en las que

$R_{sv}$ : Resistencia de la cubierta sin vegetación

$R_{cv}$ : Resistencia de la cubierta con vegetación

$T_e$ : Temperatura seca del aire exterior, K

$T_i$ : Temperatura interior, medida en la capa más interna de la cubierta del edificio, K

En la **segunda formulación** se realizó una comparación entre el flujo de calor por conducción de la cubierta con capa vegetal más el substrato de lodos compostados; la capa vegetal y el substrato; y una cubierta sin capa vegetal, pero con los mismos materiales que la primera. Los

resultados obtenidos diferían hora a hora debido a la variación de la diferencia de temperatura y a la ausencia de los factores que intervienen en su intercambio con el medio.

$$Q_{c_{cv}} - Q_{c_{v+sub}} = Q_{c_{sv}} \quad (3)$$

en la que

$Q_{c_{cv}}$ : Flujo de calor presente en la cubierta con capa vegetal y substrato

$Q_{c_{v+sub}}$ : Flujo de calor dentro de la capa vegetal y el substrato

$Q_{c_{sv}}$ : Flujo de calor en la cubierta sin capa vegetal.

La **tercera formulación** considera el balance energético entre la cubierta ecológica y el medio ambiente que la rodea (Figura 3). En ésta la conductividad térmica se realiza a partir de la comparación entre el comportamiento energético de una cobertura vegetal sobre un prado con el medio que la rodea y los flujos de calor existentes en una cubierta verde sobre un edificio, considerando que la temperatura superficial en la vegetación es la misma para ambos casos.

El balance energético entre las condiciones exteriores y la cobertura vegetal (12) cuyos factores son, la radiación, la temperatura superficial, la temperatura del aire, la emisividad y nubosidad. Se calculó mediante la ecuación de la radiación neta, propuesta por Francisco Elías Castillo en su libro de Agrometeorología, expresándose a continuación:

$$R_n = (1 - R) I_o + R L \quad (4)$$

$$R_n = (1 - R) I_o + (L_d + L_u) \quad (5)$$

$$R_n = (1 - R) I_o + [CD(1 + \alpha \cdot C) - (\epsilon \cdot \sigma \cdot T_{sv}^4)] \quad (6)$$

en las que

$R_n$ : Radiación neta sobre la cubierta vegetal, W

$R$ : Albedo, con un valor de 0,2 para la cubierta vegetal

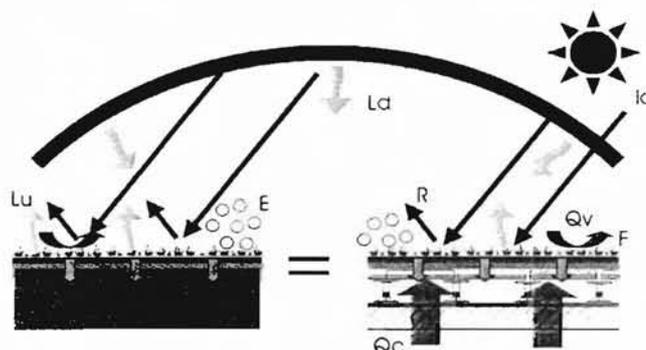


Figura 3.- Proceso de intercambio de calor entre la cubierta y el medio.

$I_0$ : Radiación solar incidente ( directa + difusa ), tomada a partir de los datos experimentales de la parcela, W  
 RL: Radiación de onda larga definida por  $L_d-L_u$ , W  
 $L_d$ : Radiación de onda larga descendente de la atmósfera  
 $L_u$ : Radiación de onda larga emitida por la vegetación  
 CD: Valor estimado para un cielo despejado  
 $\alpha$ : Factor que depende de la altura de las nubes; nubes bajas ( 0,8 – 0,9 ), nubes medias ( 0,6 – 0,7 ) y cirros ( 0,2 )  
 C: Fracción de nubes  
 $\epsilon$ : Emisividad de onda larga; 0,9  
 $\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzman;  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$   
 $T_{sv}$ : Temperatura superficial de la cobertura vegetal en K

. Los procesos biológicos propios de la vegetación: la evapotranspiración y fotosíntesis, considerando un valor promedio para ambos; 25% para la evapotranspiración y 5% para la fotosíntesis (13) (Figura 4).

. La transferencia de calor por convección entre el aire exterior y la masa de aire que se encuentra en el interior de la capa vegetal, expresado a través de la siguiente ecuación:

$$Q_v = A \cdot hc \cdot (T_e - T_{iv}) \quad (7)$$

. La transmisión de calor de los materiales que conforman la cubierta del edificio, para la cual se realizó una aplicación directa de la Ley de Fourier Ec. (9).

$$Q_c = A \cdot U \cdot (T_e - T_i) \quad (8)$$

$$Q_c = 1 \cdot [1/R_{si} + R_m + (e/\lambda)] \cdot (T_e - T_i) \quad (9)$$

Estos cuatro procesos y los datos experimentales obtenidos en la parcela, permiten formular la siguiente ecuación de balance térmico para la cubierta ecológica, de la cual se obtiene el valor más preciso para la conductividad térmica equivalente:

$$\lambda = \frac{\{ \{ \{ \{ (1-R) \cdot I_0 + RL \} - 20\%E - 5\%F \pm [A \cdot hc \cdot (T_e - T_{iv})] \} \} / (T_{sv} - T_i) \} \cdot e \} / \{ 1 - (R_{si} + R_m) \cdot \{ \{ \{ (1-R) \cdot I_0 + RL \} - 20\%E - 5\%F \pm [A \cdot hc \cdot (T_e - T_{iv})] \} \} / (T_{sv} - T_i) \} \} \quad (10)$$



Figura 4.- Procesos biológicos ocurridos en la vegetación producto de la radiación solar. Fuente: Phillipson, John. *Ecología Energética* (14).

en las que

$Q_v$ : Flujo de calor por convección dentro de la capa vegetal, W

A: Área

hc: Coeficiente convectivo para un flujo de aire en régimen turbulento;  $hc = 1,52 \cdot (T_e - T_{iv})^{0,33}$

$T_{iv}$ : Temperatura del aire dentro de la capa vegetal, K.

$Q_c$ : Flujo de Calor por Conducción, W

A: Área, m

$R_{si}$ : Resistencia superficial interna de la cubierta,  $\text{m}^2 \text{ K/W}$

$R_{\Sigma m}$ : Resistencia de los materiales de la cubierta del edificio que están debajo de la capa vegetal y el substrato,  $\text{m}^2 \text{ K/W}$

e: Espesor de la capa vegetal más el substrato, m

$\lambda$ : Conductividad térmica de la capa vegetal más el substrato,  $\text{W/mK}$

$T_e$ : Temperatura seca del aire exterior, K

$T_i$ : Temperatura interior, medida en la capa más interna de la cubierta del edificio, K

#### Análisis de los valores de la conductividad térmica equivalente

Con la ecuación del balance energético entre la cubierta ecológica y el medio se calcularon los valores de conductividad térmica para un periodo de 24 horas con los datos experimentales para un día tipo del mes de marzo, el 28 de julio como el día más caliente del año 97 y el 2 de enero como el día con las menores temperaturas del 97. Esto arrojó como resultados para los tres días elegidos un valor de  $0,12 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$  (ver tabla 1); existiendo variaciones del valor después del cuarto decimal, porque los valores de temperatura, radiación solar, evapotranspiración y fotosíntesis no son los mismos para los tres días analizados.

Para comprobar la efectividad de estos valores se realizó un cálculo con la tabla de evolución de las temperaturas internas (7), con el área y los materiales de la parcela experimental, donde se estableció una comparación entre los valores de temperatura de la capa más interna de la cubierta y el coeficiente de estabilidad térmica, entre los datos experimentales de la parcela 8 y los arrojados por el cálculo de la tabla.

Como puede observarse en la tabla, los valores de temperatura interior procedentes de la experimentación difieren en 3 ó 4  $^\circ\text{C}$  de los datos obtenidos de la tabla de evolución de las temperaturas, ya que debajo de la capa de materiales más interna de las cubiertas experimentales se encuentra un forjado que cubre un espacio acondicionado durante todo el año, generando mayores temperaturas durante los meses más fríos y menores temperaturas durante los meses más cálidos (Figuras 5, 6 y 7). En cuanto a la estabilidad térmica se observan valores muy parecidos

TABLA 1

Valores de conductividad térmica obtenidos a través de la ecuación del balance energético de la cubierta vegetal.

| H<br>O<br>R<br>A | MES       |           |           |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
|                  | ENERO     | MARZO     | JULIO     |
|                  | $\lambda$ | $\lambda$ | $\lambda$ |
| A                | W/m °C    | W/m °C    | W/m °C    |
| 0                | 0,1224634 | 0,1224584 | 0,1224634 |
| 1                | 0,1224661 | 0,1224583 | 0,1224612 |
| 2                | 0,1224628 | 0,1224581 | 0,1224619 |
| 3                | 0,1224627 | 0,1224580 | 0,1224600 |
| 4                | 0,1224625 | 0,1224579 | 0,1224592 |
| 5                | 0,1224619 | 0,1224578 | 0,1224591 |
| 6                | 0,1224611 | 0,1224578 | 0,1224589 |
| 7                | 0,1224605 | 0,1224577 | 0,1224588 |
| 8                | 0,1224606 | 0,1224578 | 0,1224593 |
| 9                | 0,1224608 | 0,1224582 | 0,1224612 |
| 10               | 0,1224611 | 0,1224598 | 0,1224763 |
| 11               | 0,1224618 | 0,1224626 | 0,1224211 |
| 12               | 0,1224652 | 0,1224660 | 0,1224533 |
| 13               | 0,1224699 | 0,1224797 | 0,1224567 |
| 14               | 0,1224937 | 0,1224279 | 0,1224583 |
| 15               | 0,1224317 | 0,1224409 | 0,1224586 |
| 16               | 0,1224296 | 0,1224454 | 0,1224587 |
| 17               | 0,1225001 | 0,1224412 | 0,1224587 |
| 18               | 0,1224911 | 0,1225257 | 0,1224588 |
| 19               | 0,1224858 | 0,1224659 | 0,1224588 |
| 20               | 0,1224764 | 0,1224462 | 0,1224589 |
| 21               | 0,1224807 | 0,1224601 | 0,1224561 |
| 22               | 0,1224803 | 0,1224594 | 0,1224706 |
| 23               | 0,1224794 | 0,1224590 | 0,1224660 |

entre los dos resultados obtenidos, quedando demostrado de esta manera la efectividad del valor de la conductividad térmica, obtenido a través de la ecuación del balance energético.

Los ensayos de laboratorio, realizados por el Ministerio de Fomento de España, para determinar la conductividad térmica de una muestra de sustrato compuesto por corteza de pinos mezclada con lodos compostados, arrojan un valor de 0,192 W/mK, para el sustrato con humedad de 65% y 0,065 W/mK para un sustrato seco, con cual queda validada la ecuación.

### El clima en la comunidad de Madrid

Madrid está ubicada a 40° latitud norte y a 667 m sobre el nivel del mar. La principal característica del clima de Madrid es la diferencia de temperaturas entre el día y la noche, y las situaciones extremas, ya que presenta inviernos muy fríos y húmedos y veranos muy cálidos y secos. Asimismo tiene escasez de lluvias, localizadas principalmen-

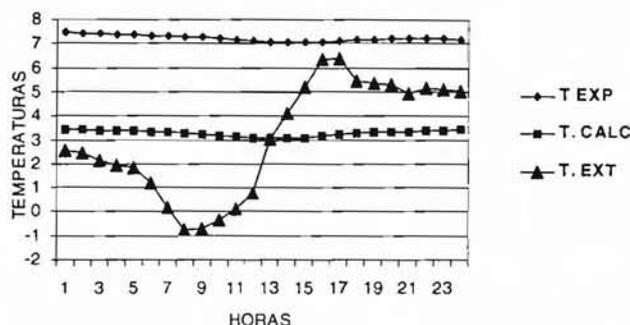


Figura 5.- Comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la tabla de evolución de temperaturas para un día tipo del mes de enero.

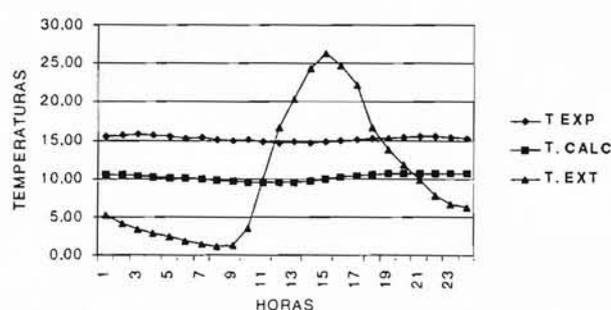


Figura 6.- Comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la tabla de evolución de temperaturas para un día tipo del mes de marzo.

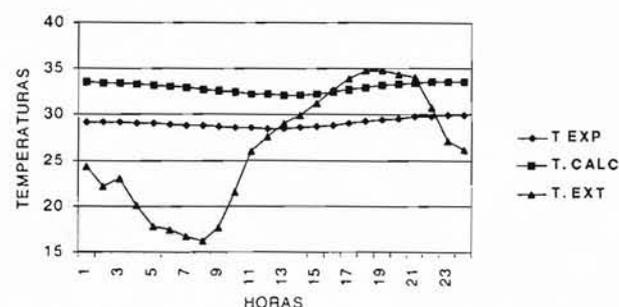


Figura 7.- Comparación entre los datos experimentales y los datos obtenidos con la tabla de evolución de temperaturas para un día tipo del mes de julio.

te en primavera y en otoño, con un promedio de 300 mm. Las temperaturas medias en invierno, correspondientes al mes de enero, oscilan entre los 4 y 6 °C. Durante el verano las temperaturas medias, correspondientes al mes de julio, van desde los 16 °C hasta los 31,7 °C. La humedad relativa presenta valores entre el 42% y 79%. Esto demuestra que el diseño de las edificaciones debe adaptarse flexiblemente a condiciones tan extremas (15).

### El clima en la ciudad de Maracaibo

Maracaibo, es la segunda ciudad más importante de Venezuela, está ubicada a 10° 40' latitud norte y a 71° 30' longitud oeste, es una ciudad caracterizada por un

clima cálido húmedo durante todo el año. Presenta una temperatura máxima media que alcanza los 32,85 °C durante el mes de agosto y una temperatura mínima media de 23,12 °C durante el mes de enero. Los valores de humedad relativa media oscilan durante todo el año entre el 50% y el 95%. La precipitación promedio anual es de 490 mm y un máximo en 24 horas de 105 mm [9]. Los vientos predominantes provienen del NNE y las brisas llegan a la ciudad cargadas de humedad debido a la presencia del Lago de Maracaibo y el Golfo de Venezuela. El promedio de la velocidades del viento es de 3 m/s, presentándose períodos de calma. La radiación solar máxima media sobre el plano horizontal se acerca a los 600 W/m<sup>2</sup> y los máximos superan los 900 W/m<sup>2</sup>. Los valores radiación difusa son cercanos al 65% de la radiación total recibida (7).

### Descripción de los edificios

Para el análisis del comportamiento térmico se diseñó una edificación monoespacial con cubierta plana, una superficie de 57,6 m<sup>2</sup> y una altura de 2,7 m. La proporción y orientación del modelo para Maracaibo corresponde a 1:1,7 propuesto por Olgyay en su libro *Design With Climate*, para un clima cálido húmedo y para el modelo de Madrid una proporción de 1:1,6 propuesto como solución óptima para climas templados y como límite máximo para climas áridos (2). El área de las aberturas es un tercio del área del muro y están localizadas en las fachadas norte y sur (Figura 8).

La ventilación se evalúa con el edificio: a) cerrado durante las 24 horas; b) abierto durante la noche y cerrado durante el día; c) abierto las 24 horas con; d) abierto durante el día y cerrado durante la noche. Para todos los modelos abiertos se asume una renovación de aire de 20 cambios a la hora.

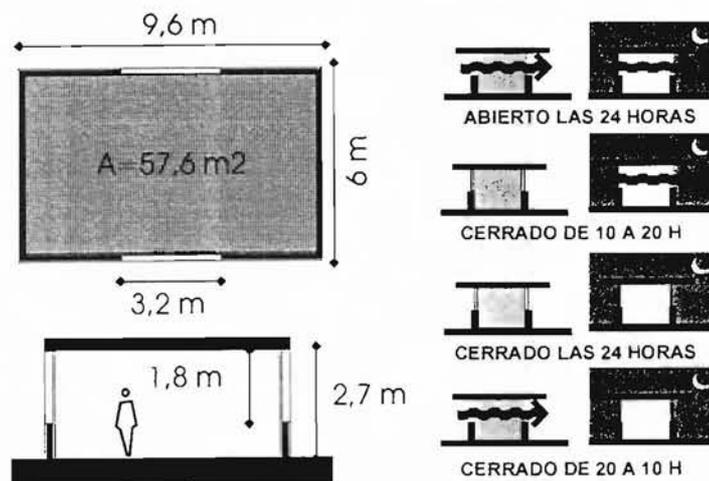


Figura 8.- Modelo utilizado en las simulaciones térmicas y modos de ventilación.

Los edificios son analizados con cargas térmicas interiores generadas por cuatro personas en un períodos de tres horas en la mañana, tres horas durante el mediodía y nueve horas durante la noche, y el uso de artefactos electrodomésticos durante las 8 horas, a las 13 horas y a las 20 horas.

### Sistemas constructivos de cubiertas analizadas

Para el análisis de los modelos propuestos se utilizaron 5 alternativas de cubierta:

Cubierta ecológica experimental, conformada por vegetación de bajo porte (Sedum), substrato de lodos compostados, impermeabilizante, 4 cm de hormigón liviano y 4 cm de aislamiento impermeable (Tabla 2).

Cubierta ajardinada con vegetación de bajo porte, substrato de lodos compostados con un espesor de 8 cm, impermeabilizante y, como soporte, una losa nervada de hormigón (Tabla 3).

Cubierta ajardinada intensiva con una capa de substrato de 30 cm de espesor, impermeabilizante, y una losa nervada de hormigón como soporte (Tabla 4).

Cubierta con aislamiento exterior sobre una losa nervada de hormigón (Tabla 5).

Losa nervada de hormigón con aislamiento interior (Tabla 6).

### Herramienta utilizada para la simulación de modelos

Los modelos propuestos son analizados con el cálculo de evolución de las temperaturas propuesto por F. Javier

TABLA 2

Características térmicas de la cubierta ecológica experimental

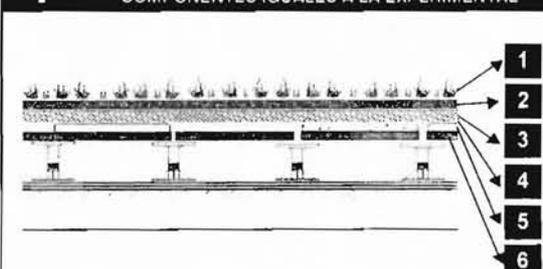
| MODELO  | MATERIAL   | e<br>m | $\lambda$<br>W/m°C | Ce<br>J/Kg°C | d<br>kg/m <sup>3</sup> |
|---|--|--------|--------------------|--------------|------------------------|
| <b>1</b><br>CUBIERTA VEGETAL DE TIPO EXTENSIVO CON COMPONENTES IGUALES A LA EXPERIMENTAL<br> | <b>1</b> SEDUM MÁS SUSTRATO DE LODOS COMPOSTADOS           | 0,18   | 0,12               | 1424         | 400                    |
|   | <b>2</b> ÁRIDO NATURAL                                     | 0,02   | 0,08               | 145          | 150                    |
|   | <b>3</b> PANEL RETENEDOR DE AGUA DE 32 mm, DE LANA DE ROCA | 0,003  | 0,19               | 750          | 140                    |
|   | <b>4</b> MEMBRANA GA1 JARDÍN DE DANOSA DE 6 mm             | 0,005  | 0,19               | 650          | 100                    |
|   | <b>5</b> HORMIGÓN DE AGREGADO LIVIANO                      | 0,04   | 0,95               | 1000         | 2000                   |
|   | <b>6</b> POLIURETANO                                       | 0,04   | 0,03               | 1420         | 30                     |
| <b>RESISTENCIA TÉRMICA: 3,39 - TRANSMITANCIA: 0,29</b>  |  |        |                    |              |                        |

TABLA 3

Características térmicas de la cubierta ecológica sobre losa nervada

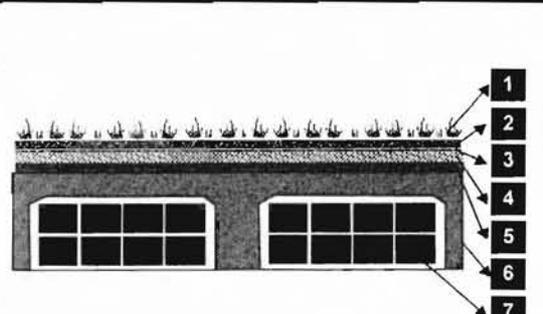
| MODELO   | MATERIAL   | e<br>m | $\lambda$<br>W/m°C | Ce<br>J/Kg°C | d<br>kg/m <sup>3</sup> |
|--|--|--------|--------------------|--------------|------------------------|
| <b>2</b><br>CUBIERTA VEGETAL DE TIPO EXTENSIVO SOBRE UNA LOSA NERVADA<br> | <b>1</b> SEDUM MÁS SUSTRATO DE LODOS COMPOSTADOS           | 0,18   | 0,12               | 1424         | 400                    |
|  | <b>2</b> ÁRIDO NATURAL                                     | 0,02   | 0,08               | 145          | 150                    |
|  | <b>3</b> PANEL RETENEDOR DE AGUA DE 32 mm, DE LANA DE ROCA | 0,003  | 0,19               | 750          | 140                    |
|  | <b>4</b> MEMBRANA GA1 JARDÍN DE DANOSA DE 6 mm             | 0,005  | 0,19               | 650          | 100                    |
|  | <b>5</b> IMPERMEABILIZACIÓN                                | 0,01   | 0,58               | 1140         | 1700                   |
|  | <b>6</b> LOSETA DE HORMIGÓN                                | 0,05   | 1,4                | 1000         | 2200                   |
|  | <b>7A</b> BLOQUE DE ARCILLA, ARCILLA                       | 0,05   | 0,56               | 920          | 1800                   |
|  | <b>7B</b> BLOQUE DE ARCILLA, CÁMARA DE AIRE                | 0,1    | 0,029              | 1180         | 1,2                    |
| <b>RESISTENCIA TÉRMICA: 5,61 - TRANSMITANCIA: 0,18</b>   |  |        |                    |              |                        |

TABLA 4

Características térmicas de la cubierta intensiva sobre losa nervada

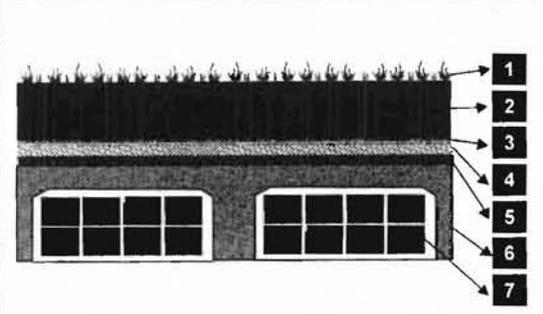
| MODELO   | MATERIAL   | e<br>m | $\lambda$<br>W/m°C | Ce<br>J/Kg°C | d<br>kg/m <sup>3</sup> |
|--|--|--------|--------------------|--------------|------------------------|
| <b>3</b><br>CUBIERTA VEGETAL DE TIPO INTENSIVO SOBRE UNA LOSA NERVADA<br> | <b>1</b> SEDUM MÁS SUSTRATO DE LODOS COMPOSTADOS | 0,18   | 0,12               | 1424         | 400                    |
|  | <b>2</b> SUSTRATO                                | 0,3    | 2,1                | 1200         | 1800                   |
|  | <b>3</b> ÁRIDO NATURAL                           | 0,02   | 0,08               | 145          | 150                    |
|  | <b>4</b> MEMBRANA GA1 JARDÍN DE DANOSA DE 6 mm   | 0,005  | 0,19               | 650          | 100                    |
|  | <b>5</b> IMPERMEABILIZACIÓN                      | 0,01   | 0,58               | 1140         | 1700                   |
|  | <b>6</b> LOSETA DE HORMIGÓN                      | 0,05   | 1,4                | 1000         | 2200                   |
|  | <b>7A</b> BLOQUE DE ARCILLA, ARCILLA             | 0,05   | 0,56               | 920          | 1800                   |
|  | <b>7B</b> BLOQUE DE ARCILLA, CÁMARA DE AIRE      | 0,1    | 0,029              | 1180         | 1,2                    |
| <b>RESISTENCIA TÉRMICA: 5,73 - TRANSMITANCIA: 0,17</b>   |  |        |                    |              |                        |

TABLA 5

Características térmicas de losa nervada con aislamiento exterior

| MODELO  | MATERIAL                                    | e<br>m | $\lambda$<br>W/m°C | Ce<br>J/Kg°C | d<br>ka/m <sup>3</sup> |
|---|---|--------|--------------------|--------------|------------------------|
| <b>4</b> CUBIERTA CON AISLAMIENTO EXTERIOR SOBRE UNA LOSA NERVADA<br> | <b>1</b> IMPERMEABILIZACIÓN                 | 0,01   | 0,58               | 1140         | 1700                   |
|   | <b>2</b> POLIURETANO                        | 0,04   | 0,03               | 1420         | 30                     |
|   | <b>3</b> MORTERO NIVELADOR                  | 0,02   | 1,4                | 1000         | 2130                   |
|   | <b>4</b> LOSETA DE HORMIGÓN                 | 0,05   | 1,4                | 1000         | 2200                   |
|   | <b>5A</b> BLOQUE DE ARCILLA, ARCILLA        | 0,05   | 0,56               | 920          | 1800                   |
|   | <b>5B</b> BLOQUE DE ARCILLA, CÁMARA DE AIRE | 0,1    | 0,029              | 1180         | 1,2                    |
| <b>RESISTENCIA TÉRMICA: 5,18 - TRANSMITANCIA: 0,19</b>                |   |        |                    |              |                        |

TABLA 6

Características térmicas de losa nervada con aislamiento interior

| MODELO   | MATERIAL                                    | e<br>m | $\lambda$<br>W/m°C | Ce<br>J/Kg°C | d<br>ka/m <sup>3</sup> |
|--|---|--------|--------------------|--------------|------------------------|
| <b>5</b> CUBIERTA DE LOSA NERVADA Y AISLAMIENTO INTERIOR<br> | <b>1</b> IMPERMEABILIZACIÓN                 | 0,01   | 0,58               | 1140         | 1700                   |
|  | <b>2</b> MORTERO NIVELADOR                  | 0,02   | 1,4                | 1000         | 2130                   |
|  | <b>3</b> LOSETA DE HORMIGÓN                 | 0,05   | 1,4                | 1000         | 2200                   |
|  | <b>4A</b> BLOQUE DE ARCILLA, ARCILLA        | 0,05   | 0,56               | 920          | 1800                   |
|  | <b>4B</b> BLOQUE DE ARCILLA, CÁMARA DE AIRE | 0,1    | 0,029              | 1180         | 1,2                    |
|  | <b>5</b> POLIURETANO                        | 0,04   | 0,03               | 1420         | 30                     |
| <b>6</b> MORTERO CON ACABADO INTERIOR                        | 0,02  | 1,1    | 1000               | 1800         |                        |
| <b>RESISTENCIA TÉRMICA: 5,18 - TRANSMITANCIA: 0,19</b>       |   |        |                    |              |                        |

Neila González (7). Este método permite determinar las cargas totales de la edificación y como evoluciona la temperatura interior; además, considera el efecto de la inercia en la edificación y el efecto de la radiación sobre los elementos opacos y transparentes de la envolvente. Otra de sus ventajas es la flexibilidad en el uso, ya que permite introducir nuevos datos y ecuaciones dentro del cálculo, y la manera didáctica de introducir y mostrar los resultados. El método consiste en una hoja de cálculo en la cual se introducen datos de temperatura exterior, irradiancia, calor específico, densidad de los materiales, factor de pérdidas.

Para determinar el porcentaje de satisfechos y el Predicted Mean Vote (PMV), y si los valores de temperatura y humedad obtenidos corresponden a la zona de bienestar se utilizó la ecuación de Fanger (16). Se asumen 100 W/m<sup>2</sup> de calor metabólico, 1,3 clo y 0 m/s durante

el invierno y 0,5 clo y 0,5 m/s en verano y para climas cálidos húmedos.

### Resultados

Para determinar la efectividad de la cubierta ecológica sobre el bienestar térmico en el interior de la edificación, se tomaron como referencia valores de temperatura de bulbo seco, humedad relativa, el índice de confort propuesto por Fanger, Predicted Mean Vote (PMV), y el porcentaje de satisfechos. Los Resultados arrojados por las simulaciones realizadas para Madrid y Maracaibo se muestran en las tablas 7, 8, 9 y 10.

Las simulaciones realizadas durante el mes de enero en Madrid muestran que la temperatura media en los modelos está entre 10 °C y 23 °C por encima de la temperatura media exterior. Y dentro de este rango los edificios que

TABLA 7

Resultados de la simulación térmica para Madrid en enero.

| <b>ENE</b> |            | <b>ABIERTO 24 H</b> |              |   | <b>CERRADO DE 10 A 20</b> |              |            | <b>CERRADO 24 H</b> |              |            | <b>CERRADO DE 21 A 9</b> |              |            |
|------------|------------|---------------------|--------------|---|---------------------------|--------------|------------|---------------------|--------------|------------|--------------------------|--------------|------------|
| <b>ALT</b> |            | <b>T. °C</b>        | <b>H R %</b> | <b>CET</b>                              | <b>T. °C</b>              | <b>H R %</b> | <b>CET</b> | <b>T. °C</b>        | <b>H R %</b> | <b>CET</b> | <b>T. °C</b>             | <b>H R %</b> | <b>CET</b> |
| <b>1</b>   | <b>MAX</b> | 15,1                | 100          | 0,11                                    | 18,8                      | 100          | 0,13       | 27,7                | 74           | 0,10       | 24,3                     | 90           | 0,08       |
|            | <b>MIN</b> | 14,0                | 47           |   | 17,6                      | 46           |            | 26,7                | 27           |            | 23,5                     | 30           |            |
|            | <b>MED</b> | 14,6                | 79           |   | 18,3                      | 72           |            | 27,2                | 45           |            | 23,8                     | 53           |            |
| <b>2</b>   | <b>MAX</b> | 14,9                | 100          | 0,07                                    | 18,6                      | 100          | 0,08       | 27,5                | 74           | 0,06       | 23,2                     | 94           | 0,05       |
|            | <b>MIN</b> | 14,2                | 48           |   | 17,8                      | 46           |            | 26,8                | 27           |            | 22,7                     | 32           |            |
|            | <b>MED</b> | 14,5                | 79           |   | 18,3                      | 72           |            | 27,2                | 45           |            | 22,9                     | 56           |            |
| <b>3</b>   | <b>MAX</b> | 14,7                | 100          | 0,04                                    | 17,9                      | 100          | 0,04       | 27,4                | 73           | 0,03       | 23,0                     | 94           | 0,03       |
|            | <b>MIN</b> | 14,4                | 48           |   | 17,5                      | 48           |            | 27,0                | 28           |            | 22,8                     | 32           |            |
|            | <b>MED</b> | 14,6                | 79           |   | 17,8                      | 74           |            | 27,2                | 45           |            | 22,9                     | 56           |            |
| <b>4</b>   | <b>MAX</b> | 14,9                | 100          | 0,08                                    | 18,6                      | 100          | 0,09       | 27,5                | 74           | 0,07       | 23,2                     | 94           | 0,05       |
|            | <b>MIN</b> | 14,2                | 48           |   | 17,8                      | 46           |            | 26,8                | 28           |            | 22,7                     | 32           |            |
|            | <b>MED</b> | 14,5                | 79           |   | 18,3                      | 72           |            | 27,2                | 46           |            | 22,9                     | 56           |            |
| <b>5</b>   | <b>MAX</b> | 16,7                | 100          | 0,47                                    | 20,9                      | 100          | 0,55       | 29,1                | 82           | 0,42       | 24,3                     | 102          | 0,32       |
|            | <b>MIN</b> | 12,3                | 44           |   | 15,7                      | 41           |            | 25,1                | 25           |            | 21,3                     | 29           |            |
|            | <b>MED</b> | 14,6                | 80           |   | 18,6                      | 72           |            | 27,2                | 46           |            | 22,5                     | 58           |            |
| <b>EXT</b> | <b>MAX</b> | 10,4                | 98           | CET: COEFICIENTE DE ESTABILIDAD TÉRMICA |                           |              |            |                     |              |            |                          |              |            |
|            | <b>MIN</b> | 0,9                 | 50           |   |                           |              |            |                     |              |            |                          |              |            |
|            | <b>MED</b> | 4,6                 | 72           |   |                           |              |            |                     |              |            |                          |              |            |

TABLA 8

Resultados de la simulación térmica para Madrid en julio.

| <b>JUL</b> |            | <b>ABIERTO 24 H</b> |              |   | <b>CERRADO DE 10 A 20</b> |              |            | <b>CERRADO 24 H</b> |              |            | <b>CERRADO DE 21 A 9</b> |              |            |
|------------|------------|---------------------|--------------|---|---------------------------|--------------|------------|---------------------|--------------|------------|--------------------------|--------------|------------|
| <b>ALT</b> |            | <b>T. °C</b>        | <b>H R %</b> | <b>CET</b>                              | <b>T. °C</b>              | <b>H R %</b> | <b>CET</b> | <b>T. °C</b>        | <b>H R %</b> | <b>CET</b> | <b>T. °C</b>             | <b>H R %</b> | <b>CET</b> |
| <b>1</b>   | <b>MAX</b> | 27,1                | 61           | 0,25                                    | 22,9                      | 76           | 0,12       | 29,7                | 53           | 0,06       | 31,0                     | 48           | 0,03       |
|            | <b>MIN</b> | 23,3                | 37           |   | 21,2                      | 48           |            | 28,9                | 35           |            | 30,6                     | 31           |            |
|            | <b>MED</b> | 25,3                | 46           |   | 22,2                      | 59           |            | 29,4                | 41           |            | 30,8                     | 35           |            |
| <b>2</b>   | <b>MAX</b> | 26,5                | 59           | 0,17                                    | 22,7                      | 75           | 0,08       | 29,7                | 53           | 0,04       | 31,0                     | 48           | 0,02       |
|            | <b>MIN</b> | 24,0                | 38           |   | 21,5                      | 48           |            | 29,1                | 35           |            | 30,6                     | 31           |            |
|            | <b>MED</b> | 25,3                | 46           |   | 22,1                      | 59           |            | 29,4                | 41           |            | 30,8                     | 35           |            |
| <b>3</b>   | <b>MAX</b> | 25,9                | 57           | 0,08                                    | 22,4                      | 74           | 0,04       | 29,5                | 52           | 0,02       | 31,4                     | 46           | 0,01       |
|            | <b>MIN</b> | 24,7                | 40           |   | 21,8                      | 49           |            | 29,3                | 35           |            | 31,2                     | 30           |            |
|            | <b>MED</b> | 25,3                | 46           |   | 22,2                      | 59           |            | 29,4                | 41           |            | 31,3                     | 34           |            |
| <b>4</b>   | <b>MAX</b> | 26,5                | 59           | 0,17                                    | 22,7                      | 75           | 0,08       | 29,6                | 53           | 0,04       | 31,0                     | 48           | 0,02       |
|            | <b>MIN</b> | 24,0                | 38           |   | 21,5                      | 48           |            | 29,0                | 35           |            | 30,6                     | 31           |            |
|            | <b>MED</b> | 25,3                | 46           |   | 22,1                      | 59           |            | 29,4                | 41           |            | 30,8                     | 35           |            |
| <b>5</b>   | <b>MAX</b> | 30,8                | 74           | 0,79                                    | 25,7                      | 75           | 0,47       | 30,9                | 59           | 0,24       | 32,0                     | 49           | 0,13       |
|            | <b>MIN</b> | 18,8                | 31           |   | 18,6                      | 41           |            | 27,3                | 33           |            | 30,0                     | 29           |            |
|            | <b>MED</b> | 25,3                | 48           |   | 22,9                      | 57           |            | 29,4                | 41           |            | 30,8                     | 35           |            |
| <b>EXT</b> | <b>MAX</b> | 31,7                | 75           | CET: COEFICIENTE DE ESTABILIDAD TÉRMICA |                           |              |            |                     |              |            |                          |              |            |
|            | <b>MIN</b> | 16,6                | 30           |   |                           |              |            |                     |              |            |                          |              |            |
|            | <b>MED</b> | 24,5                | 50           |   |                           |              |            |                     |              |            |                          |              |            |

presentan temperaturas situadas en la zona de confort para el invierno son los edificios con un cambio de aire por hora entre las 10 y las 20 horas y tres cambios de aire por hora desde las 21 hasta las 9 horas, manteniendo el porcentaje medio de satisfechos sobre el 50%, y la variación de las temperaturas interiores entre los 0,5 y 0,2 °C. Esto es producto de la radiación solar captada durante el día y acumulada en la masa interior; la disminu-

ción de la renovación de aire por hora durante un período de 10 horas; y la combinación de aislamiento exterior o capa vegetal sobre la masa de la cubierta que impide las pérdidas de calor por radiación durante la noche.

La variación diaria de la temperatura interior de los modelos con cubiertas ecológicas y con aislamiento exterior oscila desde 0,3 hasta 5,30 °C; dividiendo cada

TABLA 9

Resultados de la simulación térmica para Maracaibo en enero

| <b>ENE</b> |     | ABIERTO 24 H |       |   | CERRADO DE 10 A 20 |       |      | CERRADO 24 H |       |      | CERRADO DE 21 A 9 |       |      |
|------------|-----|--------------|-------|---|--------------------|-------|------|--------------|-------|------|-------------------|-------|------|
| ALT        |     | T. °C        | H R % | CET                                     | T. °C              | H R % | CET  | T. °C        | H R % | CET  | T. °C             | H R % | CET  |
| <b>1</b>   | MAX | 88,5         | 32    | 0,30                                    | 27,4               | 81    | 0,16 | 34,1         | 59    | 0,11 | 32,6              | 63    | 0,10 |
|            | MIN | 50,0         | 23    |   | 25,9               | 72    |      | 33,1         | 48    |      | 31,7              | 49    |      |
|            | MED | 72,9         | 27    |   | 26,8               | 75    |      | 33,6         | 52    |      | 32,0              | 55    |      |
| <b>2</b>   | MAX | 29,1         | 71    | 0,21                                    | 27,2               | 82    | 0,11 | 33,9         | 58    | 0,08 | 32,5              | 63    | 0,07 |
|            | MIN | 27,1         | 62    |   | 26,1               | 72    |      | 33,2         | 48    |      | 31,9              | 50    |      |
|            | MED | 28,2         | 67    |   | 26,7               | 76    |      | 33,6         | 52    |      | 32,1              | 55    |      |
| <b>3</b>   | MAX | 28,6         | 70    | 0,10                                    | 26,9               | 84    | 0,05 | 33,2         | 60    | 0,03 | 32,4              | 62    | 0,04 |
|            | MIN | 27,7         | 63    |   | 26,4               | 73    |      | 32,9         | 50    |      | 32,1              | 50    |      |
|            | MED | 28,2         | 67    |   | 26,7               | 76    |      | 33,0         | 54    |      | 32,2              | 55    |      |
| <b>4</b>   | MAX | 29,1         | 71    | 0,22                                    | 27,2               | 82    | 0,12 | 33,9         | 58    | 0,08 | 32,5              | 63    | 0,07 |
|            | MIN | 27,1         | 62    |   | 26,1               | 72    |      | 33,2         | 48    |      | 31,8              | 50    |      |
|            | MED | 28,2         | 67    |   | 26,8               | 76    |      | 33,6         | 52    |      | 32,1              | 55    |      |
| <b>5</b>   | MAX | 33,2         | 85    | 0,99                                    | 31,4               | 85    | 0,82 | 35,9         | 65    | 0,53 | 33,9              | 68    | 0,47 |
|            | MIN | 23,9         | 48    |   | 24,0               | 57    |      | 31,1         | 44    |      | 29,6              | 46    |      |
|            | MED | 28,2         | 68    |   | 27,8               | 71    |      | 33,6         | 53    |      | 31,2              | 58    |      |
| <b>EXT</b> | MAX | 32,2         | 73    | CET: COEFICIENTE DE ESTABILIDAD TÉRMICA |                    |       |      |              |       |      |                   |       |      |
|            | MIN | 23,1         | 60    |   |                    |       |      |              |       |      |                   |       |      |
|            | MED | 27,0         | 67    |   |                    |       |      |              |       |      |                   |       |      |

TABLA 10

Resultados de la simulación térmica para Maracaibo en julio

| <b>JUL</b> |     | ABIERTO 24 H |       |   | CERRADO DE 10 A 20 |       |      | CERRADO 24 H |       |      | CERRADO DE 21 A 9 |       |      |
|------------|-----|--------------|-------|---|--------------------|-------|------|--------------|-------|------|-------------------|-------|------|
| ALT        |     | T. °C        | H R % | CET                                     | T. °C              | H R % | CET  | T. °C        | H R % | CET  | T. °C             | H R % | CET  |
| <b>1</b>   | MAX | 30,3         | 72    | 0,28                                    | 28,2               | 82    | 0,14 | 33,3         | 64    | 0,09 | 32,8              | 65    | 0,08 |
|            | MIN | 28,1         | 65    |   | 27,2               | 75    |      | 32,6         | 56    |      | 32,2              | 54    |      |
|            | MED | 29,2         | 69    |   | 27,8               | 77    |      | 33,0         | 59    |      | 32,4              | 59    |      |
| <b>2</b>   | MAX | 29,9         | 71    | 0,20                                    | 28,1               | 83    | 0,09 | 33,2         | 64    | 0,06 | 32,8              | 65    | 0,06 |
|            | MIN | 28,4         | 66    |   | 27,3               | 74    |      | 32,7         | 56    |      | 32,3              | 57    |      |
|            | MED | 29,2         | 69    |   | 27,8               | 78    |      | 33,0         | 59    |      | 32,5              | 61    |      |
| <b>3</b>   | MAX | 29,5         | 71    | 0,09                                    | 27,9               | 84    | 0,05 | 33,1         | 63    | 0,03 | 32,6              | 65    | 0,03 |
|            | MIN | 28,8         | 66    |   | 27,5               | 74    |      | 32,8         | 56    |      | 32,4              | 55    |      |
|            | MED | 29,2         | 69    |   | 27,7               | 78    |      | 33,0         | 59    |      | 32,4              | 59    |      |
| <b>4</b>   | MAX | 30,0         | 71    | 0,21                                    | 28,1               | 83    | 0,10 | 33,2         | 64    | 0,06 | 32,8              | 65    | 0,06 |
|            | MIN | 28,4         | 66    |   | 27,3               | 74    |      | 32,7         | 56    |      | 32,3              | 54    |      |
|            | MED | 29,2         | 69    |   | 27,8               | 78    |      | 33,0         | 59    |      | 32,5              | 59    |      |
| <b>5</b>   | MAX | 33,1         | 83    | 0,97                                    | 31,1               | 83    | 0,70 | 34,4         | 69    | 0,41 | 33,6              | 68    | 0,37 |
|            | MIN | 25,6         | 54    |   | 25,6               | 66    |      | 31,2         | 53    |      | 30,7              | 52    |      |
|            | MED | 29,2         | 70    |   | 28,5               | 74    |      | 33,0         | 59    |      | 31,9              | 61    |      |
| <b>EXT</b> | MAX | 32,6         | 86    | CET: COEFICIENTE DE ESTABILIDAD TÉRMICA |                    |       |      |              |       |      |                   |       |      |
|            | MIN | 24,8         | 54    |   |                    |       |      |              |       |      |                   |       |      |
|            | MED | 28,4         | 73    |   |                    |       |      |              |       |      |                   |       |      |

uno de estos valores entre la variación de la temperatura exterior, 9,5 °C, se obtienen coeficientes de estabilidad térmica (7) entre los 0,05 y 0,58, pertenecientes a edificios muy estables, donde la fluctuación de la temperatura es inferior al 50% de la exterior, salvo en algunos de los casos con cubiertas livianas y aislamiento interior.

Durante el mes de julio las alternativas que presentan valores de temperaturas medias ubicadas dentro de la zona de confort para el verano, son las abiertas durante 24 horas, con 25,3 °C; y las cerradas de las 10 a las 20 horas, con 22,2 °C. El porcentaje de satisfechos para estos edificios se determinó con una velocidad del aire interior de 0,5 m/s, excediéndose de los límites de confort; pero si disminuimos la velocidad del aire a 0,15 m/s, los edificios abiertos durante la noche y cerrados durante el día presentarán un promedio del 90% de personas satisfechas, mientras que el promedio de satisfechos en el edificio cerrado las 24 horas disminuirá un 15% respecto al anterior. Las estrategias, como ventilación nocturna, producen un enfriamiento en la masa del edificio que podrá ser aprovechado durante las horas del día para generar bienestar cuando la temperatura exterior esté por encima de la interior.

La propuesta con mayor estabilidad térmica es el modelo que tiene una cubierta vegetal de tipo intensivo, ya que su masa térmica es mayor que la de los otros tipos de cubierta, porque al forjado del hormigón se le suman el 95% de inercia térmica efectiva de 30 cm de sustrato protegidos de la radiación por la capa vegetal.

Según estudios realizados (10), en los edificios con masa térmica y enfriamiento convectivo nocturno la temperatura media es, aproximadamente, 1 °C menos que la temperatura exterior, es por ello que en los resultados de las simulaciones en los cinco modelos de cubiertas con las cuatro estrategias de ventilación, los que presentaron un mejor comportamiento fueron los edificios cerrados desde las 10 hasta las 20 horas. Los valores horarios de temperaturas interiores en modelos cerrados en el día y abiertos durante la noche en Madrid, para un día tipo de enero y julio, se muestran en las figuras 9 y 10, respectivamente.

Las simulaciones térmicas realizadas para los modelos en la ciudad de Maracaibo, tanto en enero como en julio, muestran que los edificios con temperaturas más bajas son los modelos con cubiertas ajardinadas, tanto extensiva como intensiva y con aislamiento exterior, cerradas durante el día y abiertas durante la noche. Presentando temperaturas máximas que no superan los 28,2 °C, es decir, 1,8 °C menos que la temperatura límite de confort establecida por GIVONI (4) para países en vías de desarrollo; por otro lado, es importante resaltar que las temperaturas medias de estos modelos siempre están por debajo de la media exterior. El porcentaje de satisfechos para esta alternati-

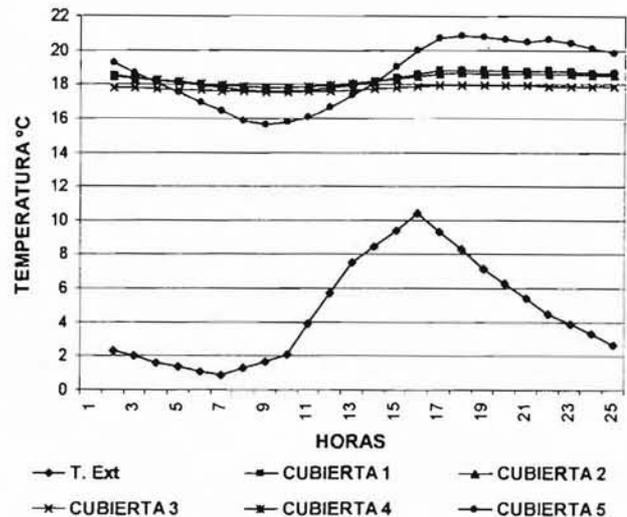


Figura 9.- Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en enero en Madrid.

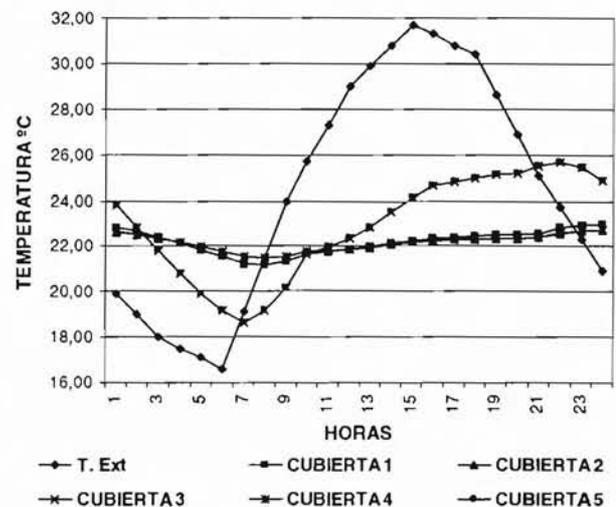


Figura 10.- Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en julio en Madrid.

va es de 86%, un 18% más que el modelo con aislamiento interior.

En climas cálidos con altos valores de humedad, se hace necesario el movimiento del aire dentro del edificio; esto, combinado con la masa térmica protegida por vegetación o aislamiento exterior de acabado claro, permite incrementar el porcentaje de satisfechos respecto a los edificios ventilados durante las 24 horas con cubiertas ligeras o con aislamiento interior.

Los coeficientes de estabilidad térmica de las propuestas con aislamiento exterior y con capa vegetal presentan coeficientes de estabilidad térmica inferiores a 0,5.

Los valores horarios de temperaturas interiores en modelos cerrados en el día y abiertos durante la noche en

Maracaibo, para un día tipo de enero y julio, se muestran en las figuras 11 y 12, respectivamente.

## Conclusiones

A través de la investigación se demuestra que es posible calcular la conductividad térmica de la capa vegetal más el substrato, utilizando de los datos experimentales y las ecuaciones de balance de calor de las interacciones que tiene ésta con su medio. El resultado obtenido para la conductividad térmica, será de gran utilidad para la realización de las simulaciones del comportamiento en las edificaciones que utilicen la cubierta ecológica como parte de la envolvente, ya que se ha obtenido un valor necesario para la realización de estos cálculos, con lo que se incrementará la precisión de los resultados arrojados en las simulaciones.

La cubierta vegetal en climas cálidos y durante el verano actúa como una cubierta con aislamiento exterior, donde,

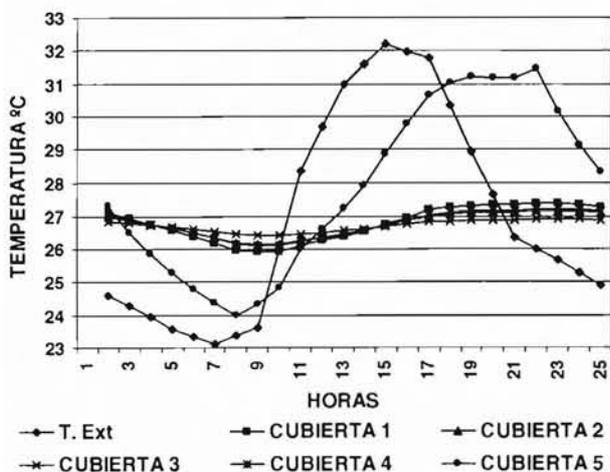


Figura 11.- Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en enero en Maracaibo.

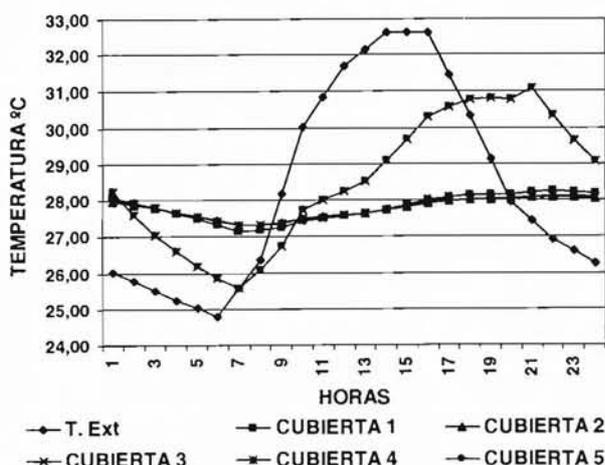


Figura 12.- Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en julio en Maracaibo.

combinada con aspectos propios de la estación o el tipo de clima, serán suficiente para proveer el confort en los espacios interiores.

En edificios con cubierta ajardinada, masa térmica y con enfriamiento convectivo nocturno durante el verano, la temperatura media interior puede estar entre 0,6 y 2 °C por debajo de la media exterior.

Cuando la cubierta vegetal es utilizada sobre masa térmica, se incrementa notablemente la estabilidad de las temperaturas interiores durante las 24 horas.

Las cubiertas con aislamiento exterior (poliestireno y capa vegetal) y con aislamiento interior, presentan los mismos valores de resistencia térmica, pero su ubicación respecto a la masa térmica y al ambiente exterior es determinante en la evolución interna de las temperaturas y en los niveles de confort, ya que al ubicar un aislamiento en el interior del espacio, dejando la masa térmica hacia el exterior, se desaprovecha la estabilidad que proporciona la misma.

Para el caso de climas cálidos húmedos como el de la ciudad de Maracaibo, cuando utilizamos cubierta vegetal no es necesario el uso de aislamiento. Pero para climas mediterráneos templados sí es necesario el uso de aislamiento, sobretodo en épocas de invierno.

Durante el invierno la efectividad de la cubierta disminuye, ya que las temperaturas exteriores sobrepasan los límites de las temperaturas requeridas por las plantas para mantener las funciones vegetales.

El uso de la cubierta vegetal puede disminuir el albedo de las ciudades con problemas de sobrecalentamiento, al mismo tiempo que minimiza el flujo de calor por conducción a través de las edificaciones.

La cubierta vegetal, desde el punto de vista ambiental es doblemente beneficiosa, ya que mejora las condiciones térmicas internas y externas, porque además de actuar como aislamiento ubicado en el exterior, trae consigo beneficios adicionales en pro de nuestra vida, mejora la calidad del aire, su uso masivo puede disminuir las temperaturas de una zona, incrementa las áreas verdes en las ciudades y disminuye el albedo de la ciudad, entre otros muchos beneficios.

## Agradecimientos

Nuestro agradecimiento al Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid y al Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura de la Universidad del Zulia.

## BIBLIOGRAFÍA

- (1) Koenigsberger, O. H.; Ingersoll, T. G.; Mayhew, A.; Szokolay, S. (1977). *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. Paraninfo. Madrid.
- (2) Olgyay, V. (1963). *Design with climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- (3) ASHRAE (1993). *ASHRAE Handbook Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioned Engineers, Inc.
- (4) Givoni, B. (1992). *Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines*. *Energy and Building*, 18, pp 11-23.
- (5) Serrá, R.; Coch, H. (1995). *Arquitectura y energía natural*. Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya.
- (6) Bedoya, C.; Neila, J. (1986). *Acondicionamiento y Energía Solar en Arquitectura*. Servicio de Publicaciones del colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- (7) Neila, J., Bedoya, C. (1997) *Técnicas arquitectónicas y constructivas de Acondicionamiento ambiental*. Editorial Munilla-León.
- (8) Memoria constructiva del proyecto de investigación "Cubiertas Ecológicas" (1997). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. PRONATUR. Madrid. España.
- (9) Haefeli, P.; Lachal, B.; Weber, W. (1998). *Experiences with Green Roof in Switzerland*. *Environmentally Friendly Cities. PLEA 98*. Lisboa. Portugal.
- (10) Givoni, B. (1997). *Climate Considerations in Building and Urban Design*. Van Nostrand Reinhold. New York.
- (11) Durán, J. M.; Navas, L. M.; Muñoz, M. A.; García, F. (1996). *Sistemas de Adquisición y análisis de datos para cubiertas ecológicas. Agricultura*. *Revista Agropecuaria*: 773, 1.046-1.048.
- (12) Castillo, F. E. (1996). *Agrometeorología*. Ediciones Mundiprensa. Madrid.
- (13) Epinatjeff, P. (1983). *Klimagerechtes Planen und Bauen*. Lecture Series Modul 12, Technical University Berlin.
- (14) Phillipson, J. (S/A). *Ecología Energética*. Ediciones Omega. Barcelona, España
- (15) La Roche, P.; Machado, M<sup>a</sup>; Mustieles, F.; Oteiza, I. (1997). *La cuarta vivienda: una propuesta bioclimática para climas cálidos*. *VII Encuentro Nacional Vivienda 97, Trabajos y Experiencias*, pp 265-282.
- (16) Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill Book Company.

\* \* \*