

LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EQUIVALENTE EN LA CUBIERTA ECOLÓGICA

María V. Machado¹, Celina Britto², Javier Neila²

¹Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura. Universidad del Zulia
Apartado Postal 15399. Maracaibo - Venezuela.

²Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónicas de la Escuela Técnica Superior de
Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid
Av. Juan de Herrera, 4. Ciudad Universitaria. 28040. Madrid. España
e-mail: mmpenso@hotmail.com, celinabritto@redestb.es, fneila@aq.upm.es

RESUMEN

A través del monitoreo de una cubierta ecológica ubicada sobre el forjado de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), España, se ha determinado la conductividad térmica equivalente. Para esto se ha formulado una ecuación que establece una relación entre el balance energético de una cobertura vegetal en un medio natural, y el balance energético de una cubierta ecológica sobre una edificación. Se han tomado en cuenta la radiación solar absorbida, reflejada, transmitida, evaportranspirada y utilizada en el proceso de fotosíntesis; el flujo de calor convectivo dentro de la capa vegetal; y las transferencias de calor por conducción. Es así entonces, como se obtiene una ecuación para el cálculo de la conductividad térmica equivalente de la cubierta ecológica, cuyo resultado (0,12 W/m°C), ha sido evaluado y comparado con los obtenidos a través del ensayo de una muestra de la misma parcela realizado en el laboratorio de materiales del Ministerio de Fomento de España.

ABSTRACT

Through the monitoring of an ecological roof located on the roof of (Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos (ETSIA) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), the thermal equivalent conductivity has been determined. For this an equation that establishes a relationship among the energetic balance of a vegetable coverage in a natural environment, and the energetic balance of an ecological cover on a roof has been formulated. Three important factors have been taken into account: the quantities of absorbed, reflected, transmitted, evaportranspired and used in the photosynthesis process solar radiation; the convective heat flow within the vegetable layer; and the conductivity heat flow. Through this process, an equation for the calculus of the thermal equivalent conductivity of the ecological roof is obtained, (0,12 W/m°C), it has been evaluated and compared with those obtained through the essay of a sample of the same parcel carried out in the materials laboratory of the Ministerio de Fomento de España.

1. INTRODUCCIÓN

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 el espacio. 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 insostenibles.

Para el diseño térmico para las edificaciones es necesario conocer las características ópticas y termofísicas de los materiales. Es por ellos que para trabajar térmicamente con las cubiertas ecológicas, se hizo necesario determinar los factores desconocidos que se necesitan para realizar el cálculo, como lo son la conductividad térmica equivalente; y el efecto de enfriamiento evapotranspirativo respecto a la radiación durante el día y a la ventilación en el período nocturno, que afecta la temperatura sol aire de la superficie.

La cubierta vegetal tiene como característica principal el ser un material activo respecto a las condiciones climáticas del sitio donde se encuentre, esta particular característica es la diferencia fundamental frente a los otros materiales de construcción, ya que estos no interactúan con el medio sino que se impregnan de las condiciones circundantes.

El valor de la conductividad térmica para los materiales inertes, se obtiene a través de ensayos de laboratorios con equipos que utilizan 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.

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 sustrato; lo trae que como consecuencia un dificultades en el cálculo del flujo de calor a través de este tipo de cubierta, y diferencias entre los valores reales y los obtenidos a través de simulaciones.

2. LA CUBIERTA ECOLÓGICA

La cubierta ajardinada puede ser extensiva o intensiva. La cubierta ecológica o extensiva, es un tipo de cubierta ajardinada, que tiene una capa vegetal de pocos centímetros de espesor (menor de 10 cm), con plantas de bajo porte (autóctonas), con abastecimiento de agua y sustancias nutritivas por procesos naturales.

3. EL CLIMA DE 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. Así mismo tiene escasez de lluvias, localizadas principalmente 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%. (Neila y Bedoya, 1997).

3. MUESTRA. PARCELA EXPERIMENTAL

Para el cálculo de la conductividad térmica equivalente se han utilizado los datos procedentes del proyecto de investigación: “Cubierta ecológica monitoreada e instalada en la terraza de economía de la ETSIA”, ubicada sobre el forjado original del edificio de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos en la Ciudad Universitaria (ETSIA), este proyecto por la Universidad de Berlín en participación con la Universidad Politécnica de Madrid, España.

Entre las once parcelas planas, se seleccionó la parcela 8 (fig. 1) para determinar la conductividad térmica equivalente, ya que cubría mayor superficie de la parcela con las plantas. Las dimensiones de la parcela son 2 m x 4,3 m, cubriendo un área de 8,6 m², dentro de la cual se disponen cuatro clases de plantas: sedum oreganum, sedum spurium, sedum reflexium y sedum álbum de acuerdo a la densidad del follaje y de su resistencia con respecto a los materiales que lo rodean (fig. 2). La selección de varias clases de sedum, se hace porque era la especie que mejor se adaptaban a las condicionantes climáticas, sustrato, estructura de la cubierta, cobertura de la superficie sin cuidado de ninguna clase.

Las características que reúne esta planta para ser seleccionada en la experimentación son: 1) capacidad para soportar temperaturas extremas; 2) 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; 3) desarrollo en la superficie, con suficiente capacidad de crecimiento horizontal para tapizar la cubierta; 4) capacidad de crecer en suelos pocos profundos.

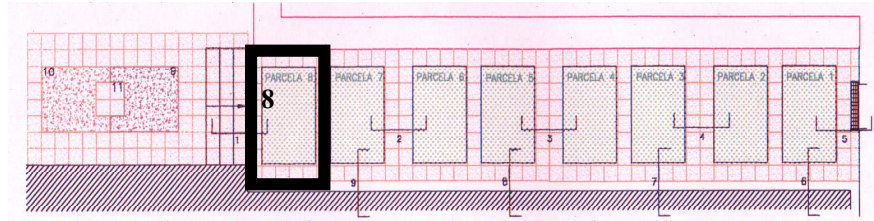


Figura 1. Planta de la azotea del edificio de Agrónomos donde se disponen las parcelas

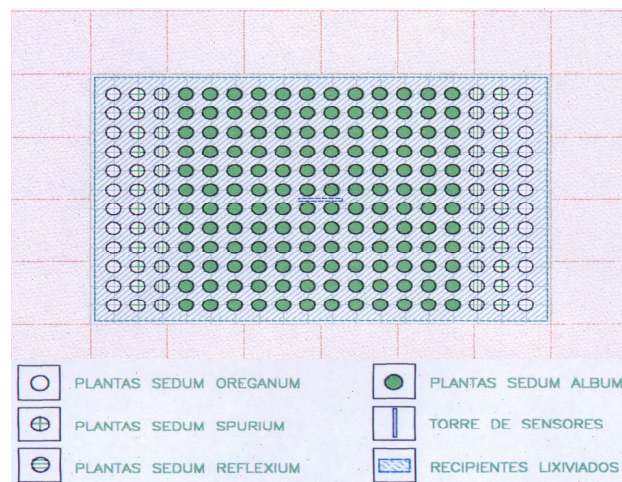


Figura 2. Plantas de la parcela tipo

Este módulo está compuesto 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 extruado por la parte inferior funciona como soporte del sustrato. El espacio interior es simulado a través de la creación de la cámara de aire de 10 cm de espesor sobre el forjado del edificio.

Para la elección del tipo de sustrato se tomó en cuenta, un mantenimiento prácticamente nulo, por la cual se seleccionó un sustrato capaz de retener grandes cantidades de agua para que la planta pueda disponer de esta durante los grandes períodos de sequía.

El sustrato de lodos compostados está dentro de los sustratos orgánicos, ha sido elaborado a partir de las materias vegetales procedentes de pinos, 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 (Duran et al, 1996).

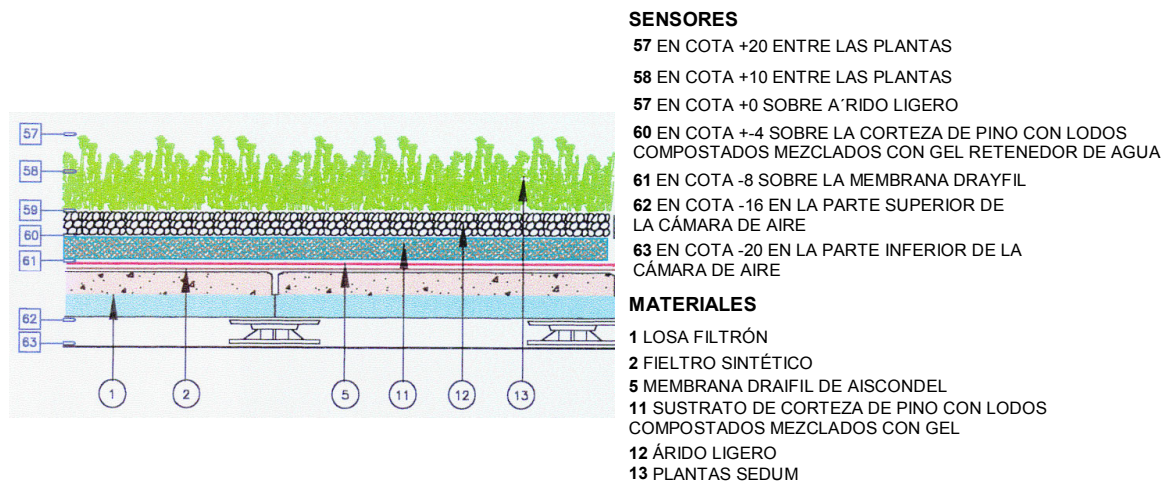


Figura 3. Cubierta ecológica de la parcela 8 del Edificio de Agrónomos

3.1 Sensores.

Con el objetivo de obtener información detallada acerca de las características higrotérmicas de la cubierta, se situaron sensores de temperaturas (Durán et al, 1996) entre las distintas capas que componen el sistema de cubierta, y concretamente en tres posiciones específicas: 1) en el forjado del edificio, 2) bajo la capa de aislamiento térmico; 3) en el sustrato

Para medir la temperatura del suelo y de las capas se han utilizados sensores termorresistivos o RTD, de platino (PT-100), siendo necesario alimentar el circuito eléctrico que forma parte de él. El método utilizado para la toma de medidas está basado en una determinación directa de tensiones a cuatro hilos, asegurando la estanqueidad frente a la lluvia y a posibles riesgos.

Aspectos técnicos de los sensores instalados en las cubiertas:

Elemento sensor: sensor de Platino tipo PT-100

Rango de medida: -30°C-70°C

Exactitud a 25°C: <+/-0,2% desde -30 a 150°C

Precisión: 0,1°C

Constante de tiempo: 10 segundos en aire

Deriva por temperatura: 10,35°C/70°C

Salida: de 0 a 1 V para el rango -30°C a 70°C

Puntos de calibración: 0 y 100°C

4. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EQUIVALENTE

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, absorptividad, emisividad, difusividad, efusividad, calor específico y densidad

El valor de la conductividad térmica para los materiales inertes, se obtiene a través de ensayos de laboratorios 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, evapotranspiración, humedad, radiación solar, precipitación, fotosíntesis, etc.

El cálculo de la conductividad equivalente condujo hacia la formulación de tres ecuaciones, utilizando los datos provenientes del monitoreo 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 las 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 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.

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

La *tercera formulación* considera el balance energético entre la cubierta ecológica y el medio ambiente que la rodea. En esta 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. Esto permite formular una ecuación que toma en cuenta:

- El balance energético entre las condiciones exteriores y la cobertura vegetal, (Castillo, 1996) cuyos factores son el albedo, 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, y se expresa a continuación:

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

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

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

- 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 (Epinatjeff, 1983).
- 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:

$$Q_v = A * h_c * (T_e - T_{iv}) \quad (7)$$

- 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).

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

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

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:

$$\lambda = \frac{\left\{ \frac{[(1-R) \cdot I_o + R L] - 20\% E - 5\% F \pm [A \cdot h_r \cdot (t_e - t_{iv})]}{(t_{sv} - t_i)} \right\} \cdot e}{1 - (R_{si} + R_{\Sigma m}) \cdot \left\{ \frac{[(1-R) \cdot I_o + R L] - 20\% E - 5\% F \pm [A \cdot h_r \cdot (t_e - t_{iv})]}{(t_{sv} - t_i)} \right\}} \quad (10)$$

5. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Con la ecuación del balance energético entre la cubierta ecológica y el medio se calcularon los valores de conductividad térmica para un período 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 W/m°C (tabla 1); existiendo variaciones del valor después del cuarto decimal, porque los valores de temperatura, radiación solar, evapotranspiración, fotosíntesis no son los mismos para los tres días analizados.

Tabla 1. Valores de conductividad térmica obtenidos a través de la ecuación del balance energético de la cubierta vegetal

HORA	MES		
	ENERO	MARZO	JULIO
00	0,1224634	0,1224584	0,1224634
01	0,1224661	0,1224583	0,1224612
02	0,1224628	0,1224581	0,1224619
03	0,1224627	0,1224580	0,1224600
04	0,1224625	0,1224579	0,1224592
05	0,1224619	0,1224578	0,1224591
06	0,1224611	0,1224578	0,1224589
07	0,1224605	0,1224577	0,1224588
08	0,1224606	0,1224578	0,1224593
09	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

Para comprobar la efectividad de estos valores se realizó un cálculo con la tabla de evolución de las temperaturas internas (Neila y Bedoya, 1997), 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°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. En cuanto a la estabilidad térmica se observan valores muy parecidos 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.

Para comprobar la veracidad de la ecuación utilizada para el cálculo de conductividad térmica equivalente se realizaron ensayos de laboratorio por el Ministerio de Fomento de España, para determinar la conductividad térmica del sustrato.

Características del ensayo

Normas de ensayo: UNE 92202-89, correspondiente a: Materiales aislantes térmicos, Determinación de la conductividad térmica. Técnica del Medidor de Flujo de Calor, método asimétrico.

Material ensayado: Sustrato experimental tipo 1 (SET-1)

Dirección del flujo de calor: vertical ascendente

Dimensiones reales de las probetas de ensayo: 520 x 520 mm

Espesor real de la probeta de ensayo: 65 mm

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.

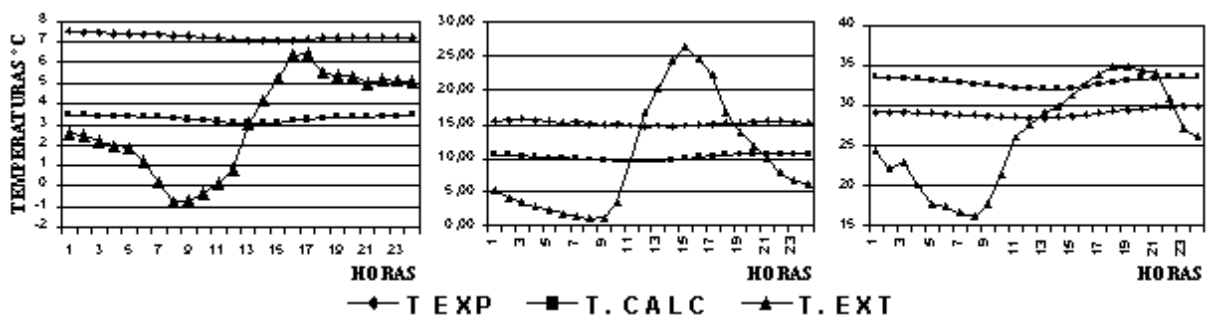


Figura 5. Comparación entre los datos experimentales y los datos calculados con la tabla de evolución de temperaturas en enero, marzo y julio.

6. CONCLUSIONES

A través de la investigación se demuestra que es posible calcular la conductividad térmica de la capa vegetal más el sustrato, utilizando de los datos experimentales y las interacciones que tiene ésta con su medio.

El resultado obtenido, 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.

NOMENCLATURA

R_{sv}: Resistencia de la cubierta sin vegetación
R_{cv}: Resistencia de la cubierta con vegetación.
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_v}: Flujo de calor en la cubierta sin capa vegetal.
R_n: Radiación neta sobre la cubierta vegetal, W.
R: Albedo, con un valor de 0,2 para la cubierta vegetal.
I_o: 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
α: 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

ε: Emisividad de onda larga; 0,9
σ: Constante de Stefan-Boltzman; $5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
T_{sv}: Temperatura superficial de la cobertura vegetal en K
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; $hc=1,52*(T_e-T_{iv})^{0,33}$
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, m² K/W
RΣm: Resistencia de los materiales de la cubierta del edificio que están debajo de la capa vegetal y el substrato m² K/W
e: Espesor de la capa vegetal más el substrato, m
λ: Conductividad térmica de la capa vegetal más el substrato, 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

7. REFERENCIAS.

- CASTILLO, Francisco Elías. Agrometeorología. Ediciones Mundiprensa. Madrid. (1996)
- DURÁN, J. M.; Navas, L. M.; Muñoz, M. A.; García, F. Sistemas de Adquisición y análisis de datos para cubiertas ecológicas. Agricultura. Revista Agropecuaria: 773, 1048-1046 (1996)
- EPINATJEFF, P. Klimagerechtes Planen und Bauen. Lecture Series Modul 12, Technical University Berlin.(1983).
- NEILA, F. Javier y Bedoya César. Técnicas Arquitectónicas y Constructivas de Acondicionamiento Ambiental 1. Ediciones Munilla-Lería. Madrid. (1997)