

Comportamiento térmico en modelos con cubiertas ecológicas*

María Machado / Instituto de Investigaciones de la Facultad de Arquitectura. Universidad del Zulia
 Celina Brito y Javier Neila / Departamento de Construcción y Tecnología Arquitectónica.
 Escuela Técnica Superior de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

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

Abstract

The main objective of this project is to establish and compare –with respect to other types of cover– the values of temperature, relative humidity, percentage of satisfaction in individuals and thermal stability coefficient, as well as loss and/or increment of heat, in buildings where ecological covers have been applied.

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, y en el verano, evitar 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 estables los niveles de temperatura y humedad 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, entre ellos Koenigsberger (1977), Olgay (1963), ASHRAE (1993), Givoni (1992), Yaglou-Drinker (en Olgay, 1992), Brooks (en Olgay, 1992) y Serrá (1995) definen las zonas de bienestar con límites inferiores que oscilan entre 18°C y 23°C y superiores localizados entre 23°C y 29,5°C; mientras que los valores de humedad relativa se encuentra entre 20% y 75%. En invierno, Serrá (1995), IT. IC, (Bedoya, C y Neila, J., 1986) y ASHRAE (1993) establecen la zona de bienestar térmico entre 18°C como límite inferior y entre 22°C y 24°C como límite superior, ubicando la humedad relativa entre 30% y 60%.

* Nuestro agradecimiento al Departamento de Construcción y Tecnologías 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.

Descriptores:

Cubiertas ecológicas; Comportamiento térmico de la cubierta

TECNOLOGÍA Y CONSTRUCCIÓN. Vol. 19-III, 2003, pp. 49-58.
 Recibido el 16/04/04 - Aceptado el 18/05/04

La cobertura es la parte del edificio que está sujeta a 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 prioritaria 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 con base en 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. Así surgió la cubierta ajardinada como una respuesta eficiente a estos y otros requisitos, con comprobadas ventajas sobre otros tipos de cubierta.

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, 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 tie-

ne inercia térmica y que cualquier alteración energética (exterior o interior) se nota inmediatamente en el ambiente interior, mientras que los valores pequeños, por debajo de 0,5 nos hablan de edificios muy estables y, por tanto, poco dispuestos a cambiar de temperatura (Neila y Bedoya, 1997).

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

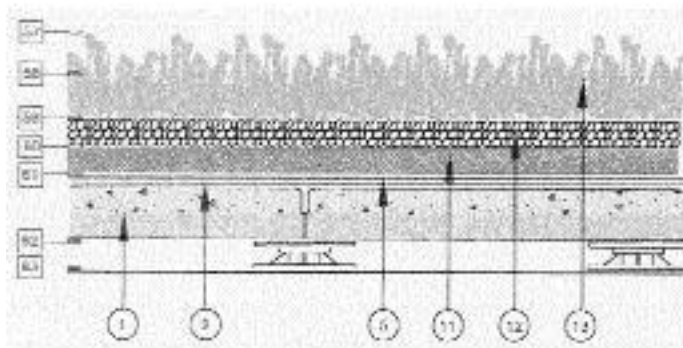
La cubierta ecológica

La cubierta ajardinada es un tipo de cubierta invertida –que puede ser extensiva o intensiva– con la adición de un sustrato orgánico y plantas en la capa superior. La cubierta ecológica o extensiva tiene una capa vegetal de pocos centímetros de espesor (normalmente menos de 10cm), con plantas de bajo porte (generalmente autóctonas), con abastecimiento de agua y sustancias nutritivas por procesos naturales.

En general las cubiertas ecológicas son montadas sobre las cubiertas planas y constan principalmente de:

- 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;

Figura 1.
La cubierta ecológica



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 membranas 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** Fielto sintético
- 5** Membrana Drayfil de aiscondel
- 11** Sustrato de corteza de pino con lodos compostados mezclados con gel
- 12** Árido ligero
- 13** Plantas Sedum

- un fieltro sintético, bajo el sustrato, para la retención de las partículas finas del sustrato;
- aislamiento térmico opcional dependiendo de las condiciones climáticas del lugar;
- una lámina de impermeabilización, generalmente anti-raíz;
- soporte estructural.

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, unas situadas sobre el edificio de Fitotecnia en el campo de prácticas de esta universidad, y la otra sobre el edificio de la ETSIA.

Estas cubiertas ecológicas están ubicadas en parcelas de 8,6 m² (2m x 4,3m), y están compuestas por una capa de plantas con 10cm de altura; 8cm 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. A través de sensores de temperatura colocados en cada nivel de la cubierta y en cada parcela se toman datos cada 15 minutos, los cuales son registrados y luego transferidos a un ordenador para su posterior análisis y determinación de factores que pueden ser utilizados en simulaciones computarizadas, como la conductividad térmica equivalente.

La conductividad térmica equivalente en la cobertura vegetal

Para determinar la conductividad térmica equivalente de la cubierta ecológica se ha formulado una ecuación que establece una relación entre el balance energético de una cobertura vegetal en la naturaleza y el balance energético de una cubierta ecológica sobre una edificación, partiendo de la igualdad entre los dos casos. Han sido consideradas las cantidades de radiación solar absorbidas, reflejadas, transmitidas, evapotranspiradas y utilizadas en el proceso de fotosíntesis. También se ha tomado en cuenta el flujo de calor convectivo a través de la capa vegetal. Por otro lado, en el análisis de la cubierta ecológica sobre una edificación han sido incorporadas las transferencias de calor por conducción que ocurren en los

materiales normales de construcción. A través de este proceso se obtuvo un valor para la conductividad térmica de 0,12 w/m² °C que corresponde a la capa vegetal más el sustrato (Machado et al., 1998), valor que fue comprobado con datos de la experimentación. Actualmente se realizan ensayos de laboratorio para determinar la conductividad térmica del sustrato.

La ecuación para el cálculo de la temperatura sol aire en la cubierta ecológica

Para establecer la ecuación que regirá el cálculo de la temperatura sol aire en la cubierta vegetal se requiere primero determinar el calor latente por evapotranspiración utilizando la ecuación de Penman Monteih y los datos provenientes de las cubiertas monitoreadas ubicadas en el edificio de Fitotecnia de la Universidad Politécnica de Madrid. Con los valores obtenidos por la ecuación se realizó un análisis estadístico con el cual se estableció la ecuación genérica utilizada en el cálculo de la temperatura sol aire durante la estación de verano y en sitios con climas cálidos. Esta ecuación engloba el efecto de la radiación sobre una cobertura vegetal, comprendiendo el enfriamiento producido por la vegetación debido al proceso de evapotranspiración, a través de la relación lineal existente entre ésta y la radiación solar. En conclusión, la temperatura sol aire de la cubierta ecológica, se determina modificando el factor de la irradiancia por el calor latente de evapotranspiración.

$$T_{sa} = T_a + \{ [(I^* - CL)/h_o] + C \} \quad [1]$$

$$CL: \{ [1,5735 \cdot (R_{nmax} - R_{namax}) + 1,8891] / (R_{nmax} - R_{namax}) \} \\ * R_n + [9088,1 / (146,13 / V_a)^{1,013}] \quad [2]$$

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. Así mismo hay escasez de lluvias, localizadas principalmente en primavera y en otoño, con un promedio de 300mm. Las temperaturas medias en invierno, correspondientes al mes de enero, oscilan entre 4°C y 6°C. Durante el verano las temperaturas medias, correspondientes al mes de julio, van desde 16°C hasta 31,7°C. La humedad relativa presenta valores entre 42% y 79% (Neila y Bedoya, 1997).

El clima en la ciudad de Maracaibo

Maracaibo es la segunda ciudad más importante de Venezuela, ubicada a 10° 40' latitud norte y a 71° 30' longitud oeste, 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 50% y 95%. La precipitación promedio anual es de 490mm con un máximo de 105mm en 24 horas. 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 velocidad del viento es de 3m/s, presentándose períodos de calma. La radiación solar máxima media sobre el plano horizontal se acerca a 600w/m² y los máximos superan los 900 w/m². Los valores radiación difusa son cercanos a 65% de la radiación total recibida (La Roche et al., 1997).

Descripción de los edificios

Para el análisis del comportamiento térmico se diseñó una edificación monoespacial con cubierta plana, una superficie de 57,6m² y una altura de 2,7m. La proporción y orientación del modelo para Maracaibo corresponde al 1:1,7 propuesto por Olgyay en su libro *Design with Climate*, para un clima cálido húmedo, y para el mo-

delo de Madrid una proporción de 1:1,6 propuesto como solución óptima para climas templados y como límite máximo para climas áridos (Olgyay, 1963). El área de las aberturas es un tercio del área del muro y están localizadas en las fachadas norte y sur.

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; d) abierto durante el día y cerrado durante la noche. Para todos los modelos abiertos se asume una tasa de renovación de aire de 20 cambios de aire hora.

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

Sistemas constructivos de cubiertas analizados

Para el análisis del comportamiento térmico en los diferentes modelos se evaluaron cinco sistemas de cubiertas de los cuales tres tienen cobertura vegetal sobre el sistema constructivo, uno tiene como acabado exterior impermeabilización de color verde y la otra es una cubierta de láminas de zinc.

A continuación se muestra la tabla con las características termofísicas de los materiales utilizados en los cinco sistemas constructivos de cubierta.

Tabla 1.
Características termofísicas de los materiales

Descripción del material	Conductividad	Calor Especifico	Densidad	Difusividad	Efusividad
	w/m °c	J/kg °C	kg/m ³	m ² /s	J/m ² K
1 Sedum más sustrato de lodos compostados	0,12	1424	400	2,11E-07	261,44
2 Arido natural	0,08	145	150	3,68E-06	41,71
3 Panel retenedor de agua de lana de roca	0,19	750	140	1,81E-06	141,24
4 Membrana GA1 jardín danosa de 5mm	0,19	650	100	2,92E-06	111,13
5 Hormigón de agregado liviano	0,95	1000	2000	4,75E-07	1378,40
6 Poliuretano	0,03	1420	30	7,04E-07	35,75
7 Sustrato	2,10	1200	1800	9,72E-07	2129,79
8 Cámara de aire	0,03	1,2	1180	2,05E-05	6,41
9 Losa de hormigón	1,40	1000	2400	5,83E-07	1833,03
10 Impermeabilización	0,58	1140	1700	299E-07	1060,21
11 Arcilla del bloque de arcilla	0,56	920	1800	3,38E-07	963,00
12 Mortero nivelador	1,40	1000	2130	6,57E-07	1407,12
13 Mortero de acabado interior	1,10	1000	1800	6,11E-07	1407,12
14 Zinc	110	390	7200	3,92E-05	17574,98

Tabla 2. Características termofísicas y ópticas del sistema constructivo 1

Sistema constructivo 1
Cubierta ecológica experimental, conformada por vegetación de bajo porte (Sedum), sustrato de lodos compostados, impermeabilizante, 4 cm de hormigón liviano y 4 cm de aislamiento impermeable.

CUBIERTA VEGETAL DE TIPO EXTENSIVO CON COMPONENTES IGUALES A LA EXPERIMENTAL

RESISTENCIA TÉRMICA m_°C/W	TRASMITANCIA TÉRMICA W/m_°C	CTT
3,39	0,29	556,84
MASA TÉRMICA ÚTIL KJ/°C	MASA TÉRMICA TOTAL KJ/°C	EMS/ABS
117,27	409,09	0,9/0,8

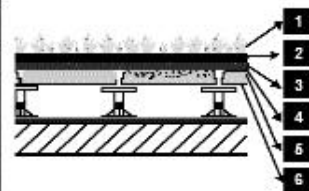


Tabla 3. Características termofísicas y ópticas del sistema constructivo 2

Sistema constructivo 2
Cubierta ajardinada con vegetación de bajo porte, sustrato de lodos compostados con un espesor de 8cm impermeabilizante y como soporte una losa nervada de hormigón.

CUBIERTA VEGETAL DE TIPO EXTENSIVO SOBRE UNA LOSA NERVADA

RESISTENCIA TÉRMICA m_°C/W	TRASMITANCIA TÉRMICA W/m_°C	CTT
5,61	0,18	636,30
MASA TÉRMICA ÚTIL KJ/°C	MASA TÉRMICA TOTAL KJ/°C	EMS/ABS
335,21	404,23	0,9/0,8

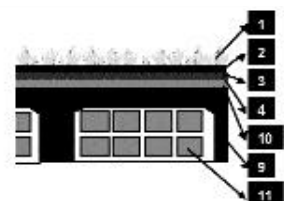


Tabla 4. Características termofísicas y ópticas del sistema constructivo 3

Sistema constructivo 3
Cubierta ajardinada intensiva con una capa de sustrato de 30cm de espesor, impermeabilizante, y una losa nervada de concreto como soporte.

CUBIERTA VEGETAL DE TIPO INTENSIVO SOBRE UNA LOSA NERVADA

RESISTENCIA TÉRMICA m_°C/W	TRASMITANCIA TÉRMICA W/m_°C	CTT
5,73	0,17	3251,20
MASA TÉRMICA ÚTIL KJ/°C	MASA TÉRMICA TOTAL KJ/°C	EMS/ABS
608,10	1912,6	0,9/0,8

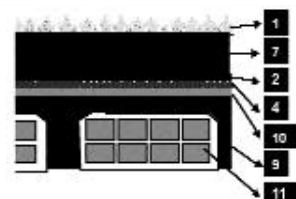


Tabla 5. Características termofísicas y ópticas del sistema constructivo 4

Sistema constructivo 4
Cubierta con aislamiento exterior sobre una losa nervada de concreto.

CUBIERTA CON AISLAMIENTO EXTERIOR SOBRE UNA LOSA NERVADA

RESISTENCIA TÉRMICA m_°C/W	TRASMITANCIA TÉRMICA W/m_°C	CTT
5,16	0,19	1877,74
MASA TÉRMICA ÚTIL KJ/°C	MASA TÉRMICA TOTAL KJ/°C	EMS/ABS
1335,02	2918,18	0,9/0,8



Tabla 6. Características termofísicas y ópticas del sistema constructivo 5

Sistema constructivo 5
Losa nervada de concreto con aislamiento interior.

CUBIERTA LIVIANA DE ZINC

RESISTENCIA TÉRMICA m_°C/W	TRASMITANCIA TÉRMICA W/m_°C	CTT
0,23	4,44	3,72
MASA TÉRMICA ÚTIL KJ/°C	MASA TÉRMICA TOTAL KJ/°C	EMS/ABS
82,53	32,32	0,9/0,8



Herramienta utilizada para la simulación de modelos

Los modelos son analizados con el cálculo de evolución de las temperaturas propuesto por Javier Neila (Neila y Bedoya, 1997). Este método permite determinar las cargas totales de la edificación y cómo 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, así como 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 (1970). Se asumen 100 w/m² de calor metabólico, 1,3 CLO y 0m/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 que arrojaron 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 tempe-

Tabla 7. Resultados de la simulación térmica para Madrid en enero

ENE		ABIERTA 24 H						CERRADA DE 10 A 20 ABIERTA DE 21 A 9						CERRADA 24 H					
ALT		T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET
1	MED	14,8	1,1	79	-3,0	9,8	0,11	18,3	1,3	72	-0,8	80,3	0,13	27,2	1,0	45	1,3	82,1	0,10
2	MCD	14,5	0,7	79	3,0	9,8	0,07	18,3	0,8	72	0,8	80,3	0,08	27,2	0,7	45	1,3	82,7	0,08
3	MCD	14,8	0,3	79	3,0	10,2	0,04	17,8	0,4	74	1,1	88,7	0,04	27,2	0,3	45	1,3	82,5	0,03
4	MFD	14,5	0,7	79	-3,0	9,8	0,08	18,3	0,8	72	-0,8	80,7	0,09	27,2	0,7	46	1,3	82,6	0,07
5	MED	14,8	1,1	80	-3,0	11,9	0,17	18,8	1,2	72	-0,7	77,3	0,55	27,2	1,0	46	1,3	82,8	0,12
EXT		T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	PMV: INDICE DE CONFORT DE FANGER						AMP: AMPLITUD TÉRMICA					
MADRID		4,6	9,5	71,8	-9,6	0,0	1	% S: PORCENTAJE DE SATISFECHOS						V: 0 m/s CLO: 1,3					
								30 CAMBIOS DE AIRE POR HORA						21 CAMBIO DE AIRE POR HORA					

Tabla 8. Resultados de la simulación térmica para Madrid en julio

JUL		ABIERTA 24 H						CERRADA DE 10 A 20 ABIERTA DE 21 A 9						CERRADA 24 H					
ALT		T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET
1	MED	25,3	3,8	48	-0,8	78,9	0,25	22,2	1,7	59	-2,4	23,3	0,12	29,4	0,9	41	1,0	74,8	0,08
2	MED	25,3	2,5	46	-0,6	83,2	0,17	22,1	1,2	59	-2,4	22,3	0,08	29,4	0,6	41	1,0	74,3	0,01
3	MH-13	25,3	1,7	46	-0,6	85,4	0,08	22,2	0,6	59	-2,4	22,5	0,04	29,4	0,3	41	1,0	74,1	0,02
4	MED	25,3	2,8	48	-0,8	83,1	0,17	22,1	1,2	59	-2,4	22,5	0,08	29,4	0,6	41	1,0	74,8	0,04
5	MH-13	25,3	17,0	48	-0,9	81,3	0,19	22,9	1,0	57	-2,0	25,8	0,47	29,4	3,6	41	1,0	73,0	0,24
EXT		T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	PMV: INDICE DE CONFORT DE FANGER						AMP: AMPLITUD TÉRMICA					
MADRID		21,5	15,1	50	-1,5	43,2	1	% S: PORCENTAJE DE SATISFECHOS						V: 0,5 m/s CLO: 0,5					
								20 CAMBIOS DE AIRE POR HORA											

ratura media exterior. Y dentro de este rango los edificios que 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 hrs. y tres cambios de aire hora desde las 21 hasta las 9 hrs., manteniendo el porcentaje medio de satisfechos sobre 50%, y la variación de las temperaturas interiores entre los 0,5°C y 0,2°C. Esto es producto de la radiación solar captada durante el día y acumulada en la masa interior: la disminución de la rata de 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°C hasta 5,30°C. Dividiendo cada uno de estos valores entre la variación de la temperatura exterior, 9,5°C, se obtienen coeficientes de estabilidad térmica entre 0,05 y 0,58 pertenecientes a edificios muy esta-

bles, donde la fluctuación de la temperatura es inferior a 50% respecto 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 0,5m/s, excediéndose de los límites de confort, pero si disminuimos la velocidad del aire a 0,15m/s, los edificios abiertos durante la noche y cerrados durante el día presentarán un promedio de 90% de personas satisfechas, mientras que el promedio de satisfechos en el edificio cerrado las 24 horas disminuirá 15% respecto del 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.

Tabla 9. Resultados de la simulación térmica para Maracaibo en enero

ENE		ABIERTA 24 H						CERRADA DE 10 A 20 ABIERTA DE 21 A 9						CERRADA 24 H					
ALT		T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET
1	MCD	27,0	9,1	73	0,6	85,1	0,30	28,8	1,5	75	0,1	93,5	0,16	33,6	1,0	52	2,6	18,1	0,11
2	MED	28,2	1,9	67	0,6	85,0	0,21	26,7	1,0	76	0,1	94,3	0,11	33,6	0,7	52	2,6	17,7	0,08
3	MFD	28,2	0,9	67	0,6	85,9	0,10	26,7	0,5	76	0,1	94,9	0,05	33,0	0,3	54	2,4	22,8	0,03
4	MED	28,2	2,0	67	0,6	85,9	0,22	28,8	1,1	76	0,1	94,2	0,12	33,6	0,8	52	2,6	17,8	0,08
5	MED	28,2	9,2	68	0,4	64,2	0,99	27,8	7,4	71	0,1	88,7	0,02	33,6	4,8	53	2,6	20,5	0,53
EXT	MED	27,0	9,1	67,1	-0,2	58,6	1	PMV: INDICE DE CONFORT DE FANGER						AMP: AMPLITUD TÉRMICA					
MARACAIBO								% S: PORCENTAJE DE SATISFECHOS						V: 0,5m/s CLO:0,5					
								20 CAMBIOS DE AIRE POR HORA											

Tabla 10. Resultados de la simulación térmica para Maracaibo en julio

JUL		ABIERTA 24 H						CERRADA DE 10 A 20 ABIERTA DE 21 A 9						CERRADA 24 H					
ALT		T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET	T. °C	AMP	HR %	PMV	% S	CET
1	MED	29,2	2,2	69	1,0	71,9	0,28	27,8	1,1	77	0,6	87,8	0,14	33,0	0,7	59	2,4	21,7	0,09
2	MED	29,2	1,5	69	1,0	72,2	0,2	27,8	0,8	78	0,6	88,0	0,09	33,0	0,5	59	2,4	21,5	0,06
3	MED	29,2	0,7	69	1,0	72,7	0,09	27,7	0,1	78	0,5	88,1	0,05	33,0	0,2	59	2,4	21,7	0,03
4	MFD	29,2	1,6	69	1,0	72,2	0,21	27,8	0,8	78	0,6	88,0	0,1	33,0	0,5	59	2,4	21,5	0,06
5	MCD	29,2	7,6	70	1,0	68,4	0,97	28,5	5,5	74	0,8	74,5	0,7	33,0	3,2	59	2,4	22,8	0,41
EXT	MED	26,4	7,8	73	0,6	69,4	1	PMV: INDICE DE CONFORT DE FANGER						AMP: AMPLITUD TÉRMICA					
MARACAIBO								% S: PORCENTAJE DE SATISFECHOS						V: 0,5 m/s CLO:0,5					
								20 CAMBIOS DE AIRE POR HORA											

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 en los otros tipos de cubierta porque al forjado del concreto se le suma 95% de inercia térmica efectiva de 30cm de substrato que están protegidos de la radiación por la capa vegetal.

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 (1992) 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 alternativa es de 86%, 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 con 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.

Figura 2.
Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en Madrid durante el mes de enero

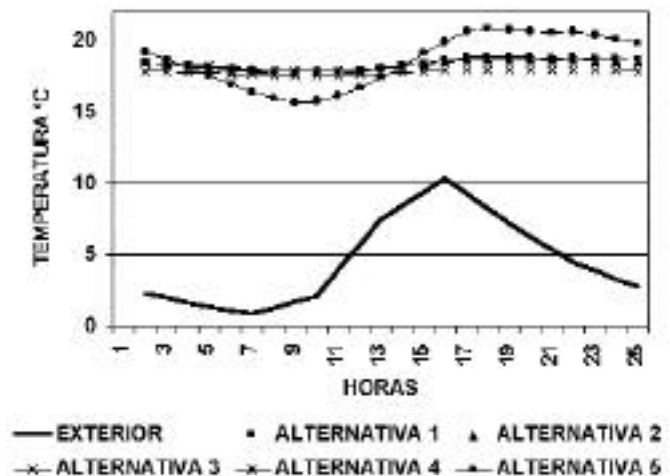
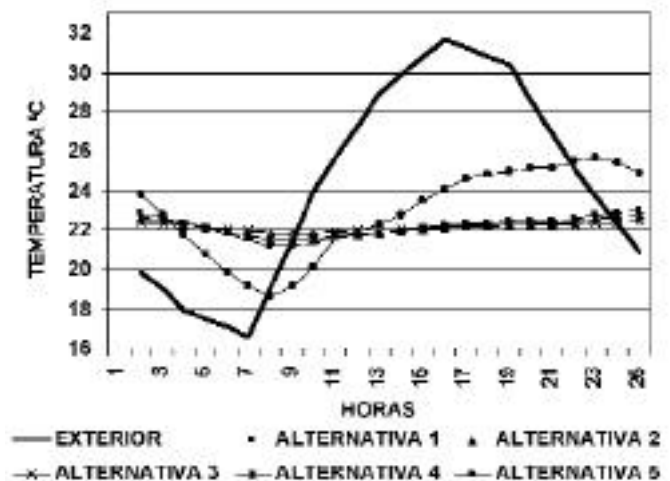


Figura 3.
Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en Madrid durante el mes de julio



Conclusiones

- La cubierta vegetal en climas cálidos y durante el verano actúa como una cubierta con aislamiento exterior que combinada con estrategias acordes con la estación o el tipo de clima son suficiente para proveer el confort en los espacios interiores.
- En edificios con cubierta ajardinada, masa térmica y enfriamiento convectivo nocturno durante el verano la temperatura media interior puede estar entre 0,6°C y 2°C por debajo de la media exterior.
- Cuando la cubierta vegetal es utilizada sobre masa térmica (losa nervada o maciza), incrementa notablemente la estabilidad de las temperaturas interiores durante las 24 horas.
- 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 pe-

ro para climas mediterráneos templados sí es necesario el uso de aislamiento, sobre todo 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 además de actuar como aislante exterior trae consigo beneficios adicionales para nuestra vida ya que aumenta 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.

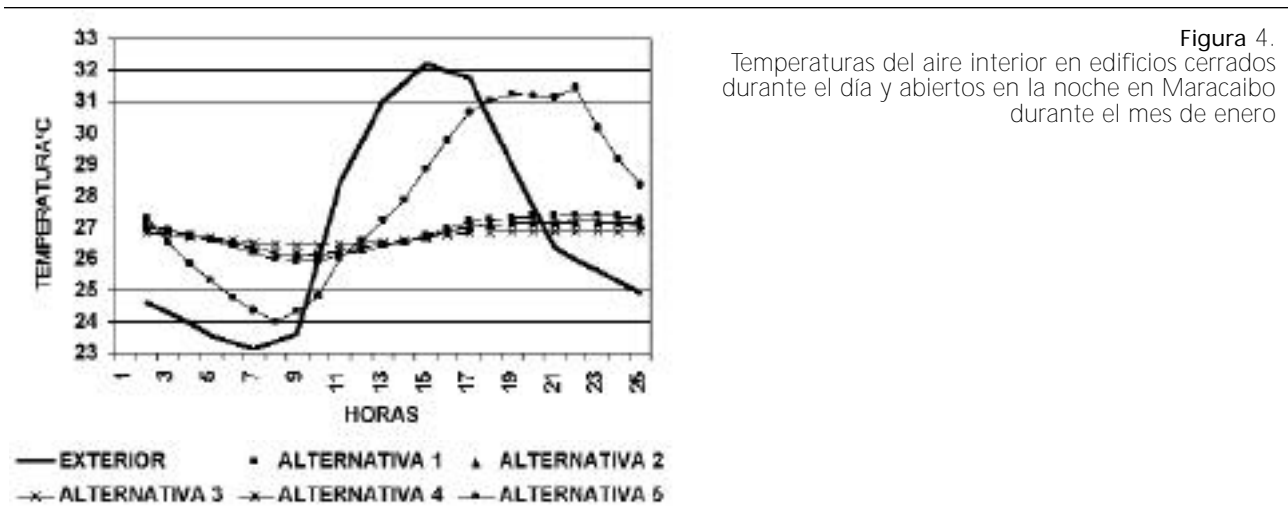


Figura 4. Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en Maracaibo durante el mes de enero

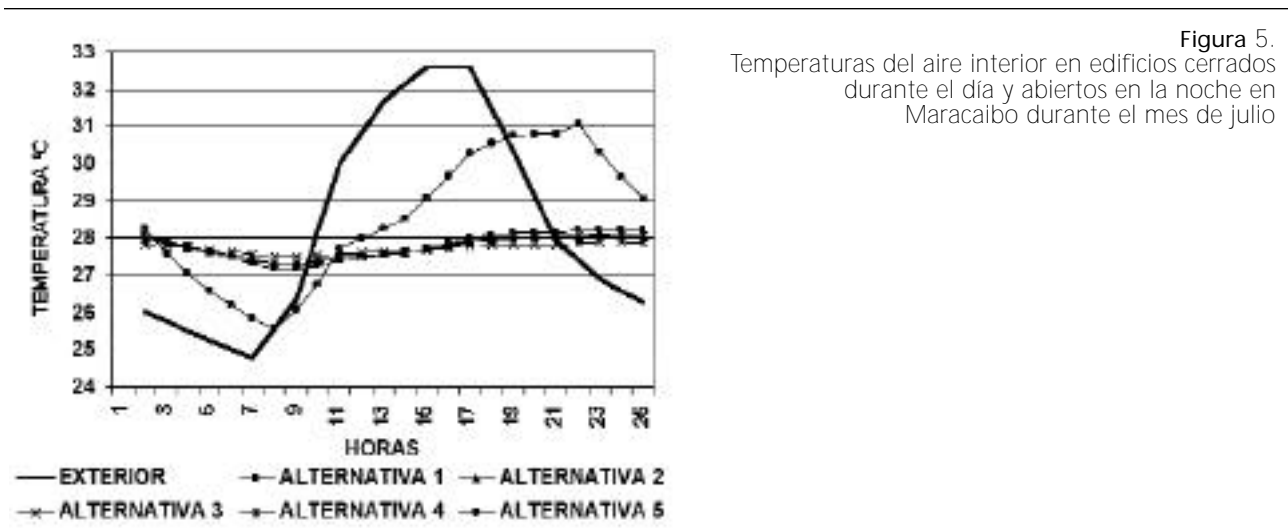


Figura 5. Temperaturas del aire interior en edificios cerrados durante el día y abiertos en la noche en Maracaibo durante el mes de julio

Glosario

:	absortividad
C:	constante, 14
CL:	Calor latente disipado por las plantas
ho:	coeficiente convectivo-radiativo
I:	Intensidad de la radiación solar total incidente en la superficie
Rg:	radiación global incidente sobre la superficie
Rn:	Radiación neta a la hora de cálculo
Rnamax:	Radiación neta anterior a la máxima, (Rgmax*a)
Rnmax:	Radiación neta máxima, (Rgmax*a)
Ta:	Temperatura del aire
Tsa:	Temperatura sol-aire
Va:	Velocidad del aire.

Referencias Bibliográficas

- ASHRAE (1993) *ASHRAE Handbook Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioned Engineers, Inc.
- Bedoya, César; Neila, Javier (1986) *Acondicionamiento y energía solar en Arquitectura*. Servicio de Publicaciones del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid.
- Fanger, P. O. (1970) *Thermal Comfort. Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- Givoni, Baruch (1992) «Comfort, climate analysis and building design guidelines», en *Energy and Building*, 18, pp 11-23.
- Koenigsberger, O. H.; Ingersoll, T. G.; Mayhew, A.; Szokolay, S. (1977) *Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales*. Paraninfo. Madrid.
- La Roche, Pablo; Machado, María; Mustieles, Francisco; Oteiza, Ignacio (1997) «La cuarta vivienda: una propuesta bioclimática para climas cálidos», VII Encuentro Nacional Vivienda 97, Trabajos y Experiencias, pp. 265-282.
- Machado, María; Britto, Celina; Neila, Javier (1998) «La conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica», X Jornadas Científico Técnicas de Ingeniería, vol. 1, pp. 156-163.
- Neila, Javier; Bedoya, César (1997) *Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental*. Editorial Munilla-León.
- Olgay, Victor (1963) *Design with climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- Serrá, Rafael; Coch, Helena (1995) *Arquitectura y energía natural*. Edicions UPC. Universitat Politècnica de Catalunya.