

Efectos del revestimiento exterior sobre la temperatura interior en un entrepiso de una edificación

Gaudy C. Bravo Morales
Nastía Almao de Herrera

RESUMEN

Se presenta un estudio comparativo de cómo los diferentes revestimientos exteriores empleados actualmente, afectan el comportamiento térmico de un entrepiso de una edificación localizada en Maracaibo, una región cálida y húmeda de Venezuela. Varias simulaciones fueron realizadas utilizando un modelo bidimensional resuelto por diferencias finita, el cual considera la configuración de la pared, la orientación y las condiciones climáticas fluctuantes como variables. Los resultados numéricos obtenidos para 9 tipos de revestimientos, dos relaciones de aspecto, dos orientaciones de pared y bajo dos meses con condiciones climáticas críticas, muestran que para espesores pequeños, el color es el factor determinante que afecta el comportamiento térmico, obteniéndose reducciones de carga térmica hasta de un 33 % cuando los colores son claros.

ABSTRACT

Effects of the external covering building wall on the indoor air temperature of building story

This work presents a comparative study which determines how different materials currently used as building wall external covering affect the thermal performance of a building story located in Maracaibo, a hot and humid region of Venezuela. Simulations were carried out using a two dimensional model solved by finite differences which considers wall composition and orientation, and the local fluctuating climatic conditions as variables. Numerical results were obtained for nine external coverings, two aspect relations, two wall orientations under two critical month climatic conditions, showing that, for small thickness, the colour in the determinant factor affecting the thermal performance, and thermal load reduction up to 33 % can be obtained if light colour materials are used as external covering.

DESCRIPTORES

Comportamiento térmico
Revestimiento
Simulación

1. INTRODUCCIÓN

En relación a la Arquitectura Bioclimática, ha surgido una polémica en los últimos años, referida al efecto que sobre el comportamiento térmico de una edificación localizada en una ciudad de clima cálido y húmedo, como el de Maracaibo (Venezuela), tiene el uso frecuente de ciertos materiales utilizados como revestimiento de la misma. Este efecto no ha sido evaluado cuantitativamente, por lo cual no existen conclusiones definitivas al respecto; a pesar de que su contribución a la ganancia de calor, sumado a las otras cargas térmicas, son de importante consideración en el logro de las condiciones internas de bienestar térmico.

Algunos estudios anteriores realizados en esta ciudad (González, 1989; Almao and Rincón, 1993), han evidenciado a través de sus resultados, la importancia de evaluar el efecto de los materiales sobre el comportamiento térmico interior de edificaciones, en virtud de que la mayoría de ellas se realizan bajo la modalidad de un sistema tradicional, en donde los componentes básicos de la misma (estructura y cerramientos) se elaboran con materiales cuyas características térmicas generan cargas energéticas elevadas. Ambos consideraron, a través de modelos experimentales a escala pequeña (González, 1989) o mediante la aplicación de un modelo de simulación computacional, (Almao and Rincón, 1993), el comportamiento térmico de edificaciones de un sólo piso, bajo las condiciones climáticas locales, y dirigidos hacia la implementación de sistemas pasivos de enfriamiento. Dichas investigaciones demostraron que la mayor ganancia de calor ocurre a través de la cubierta o techo.

Givoni (1976) reporta que el efecto del color superficial exterior sobre el comportamiento térmico de una edificación depende de las propiedades térmicas de los materiales de construcción. Bansal y otros (1992) estudiaron el efecto del color exterior, utilizando sólo los

colores blanco y negro, experimentalmente, con modelos de madera a escala pequeña, y numéricamente, con modelos computacionales unidireccionales, aplicados a edificaciones pesadas con el sistema constructivo estándar y bajo las condiciones climáticas de la India.

En vista de que en los últimos años, la ciudad de Maracaibo se ha caracterizado por el creciente desarrollo de edificaciones habitacionales de varios pisos, con un sistema de construcción tradicional que emplea constantemente, para la configuración física de las paredes exteriores, bloques huecos de arcilla roja con friso (base) exterior e interior a base de arena, cemento y agua, y que la diferencia entre las paredes la hace el tipo de revestimiento exterior utilizado; en este trabajo, se estudia el comportamiento térmico de un entrepiso de este tipo de edificación, bajo las condiciones climáticas fluctuantes locales. Para tal efecto, se analiza una sección bidimensional de un entrepiso, dejando fija la estructura básica y variando el tipo de revestimiento exterior.

Para este estudio comparativo, se emplea un modelo bidimensional basado en una técnica de diferencias finitas y el algoritmo "SIMPLE" (Patankar, 1980). Este método es bastante reconocido y ha sido utilizado extensivamente en la solución de problemas de convección natural en recintos cerrados con resultados validados. Se resuelven las ecuaciones bidimensionales de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía en forma transitoria, bajo condiciones de contorno de convección y radiación. La ganancia de calor en este tipo de edificación, a excepción del último piso, ocurre a través de las paredes exteriores y los vanos, pero en este trabajo, se considera sólo la transferencia de calor a través de las paredes exteriores (revestimientos), sin tomar en cuenta los vanos y el movimiento natural del aire dentro de la sección.

Los resultados obtenidos permitirán entonces, determinar cuales de los revestimientos exteriores incrementan la carga térmica y recomendar entre los estudiados, los más adecuados para un clima como el de Maracaibo. Estos resultados además, permitirán dar respuesta a las recientes inquietudes profesionales debido al uso insistente de algunos de estos revestimientos, como es el caso de la tablilla roja.

2. MODELO MATEMÁTICO

2.1. Formulación Matemática

El modelo matemático toma como dominio de cálculo una sección rectangular de una edificación (ver figura 1), en el cual se permite el movimiento interior del aire debido a la diferencia de densidades y la conducción no estacionaria a través de paredes y techo. No se considera ventilación interior forzada ni ventilación con

FIGURA 1
REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA SECCIÓN DE UN ENTREPISO DE UNA EDIFICACIÓN (DOMINIO DE CÁLCULO).



aire del exterior. El problema conjugado de transferencia de calor y flujo de fluidos es modelado matemáticamente a través de las ecuaciones de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, expresadas en forma bidimensional no permanente. Estas relaciones fundamentales constituyen la base de cualquier método riguroso para predecir la velocidad del aire y la distribución de temperaturas dentro de un recinto cerrado, las cuales son expresadas en forma matemática, en términos de ecuaciones diferenciales, por unidad de volumen, como:

Masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Cantidad de movimiento en una dirección "i":

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \text{div}(\rho \vec{u} u_i) = \text{div}(\mu \text{grad } u_i) - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g_i \quad (2)$$

Energía:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} h) = \text{div}\left(\frac{k}{c} \text{grad } h\right) + Sh \quad (3)$$

donde:

ρ = densidad

t = tiempo

\vec{u} = vector velocidad

u_i = componente de la velocidad en la dirección "i"
(i puede ser x, y ó z en coordenadas cartesianas)

P = presión

g_i = componente "i" de la aceleración de gravedad \vec{g}

h = entalpía específica

k = conductividad térmica

c = calor específico a presión constante

Sh = tasa volumétrica de generación de calor

2.2. Condiciones de Contorno

Ya que sólo se está considerando la carga térmica a través de la superficie exterior de un entrepiso de una edificación en altura, las condiciones de contorno consideradas son:

(1) funciones dependientes del tiempo de temperatura ambiente e irradiancia global sobre superficies verticales

orientadas, cuyo modelaje se realiza de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Almaso (1994), las cuales permiten determinar la temperatura de los nodos externos a través de un balance de energía en la superficie exterior, tomando en cuenta los diferentes modos de transferencia de calor y sus respectivas resistencias. Ver tablas 1 y 2.

(2) valores promedio de velocidad del viento correspondiente al mes de Mayo y Agosto en la ciudad de Maracaibo.

(3) propiedades ópticas y térmicas constantes de los materiales de construcción. Ver tabla 3.

(4) las superficies del piso y techo adiabáticas. Esta suposición se sustenta en el hecho de que, para un entrepiso, la transferencia de calor a través de dichas superficies es pequeña comparada con la ganancia térmica solar, y además, no hace ninguna diferencia en estudios comparativos de una misma sección con diferentes revestimientos.

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

Temperatura ambiente:

Para $0 \leq t \leq t_{min}$:

$$TF = T_{avg} + \Delta Ta \operatorname{sen} \left[\pi \frac{(1440 - (t_{max} - t_{min})/2 - (t - t_{max}))}{(1440 - (t_{max} - t_{min}))} \right] \quad (4)$$

Para $t_{min} \leq t \leq t_{max}$

$$TF = T_{avg} + \Delta Ta \operatorname{sen} \left[\pi \frac{(t - t_{min})}{(t_{max} - t_{min})} \right] \quad (5)$$

donde:

ΔTa = es la diferencia entre la temperatura ambiente máxima del día y la temperatura promedio del mes, T_{avg}

T = tiempo del día en minutos

t_{max} y t_{min} = tiempo en minutos al cual ocurre la máxima y mínima temperatura ambiente.

Irradiancia global instantánea sobre planos verticales con una determinada orientación:

Para $t_{sr} \leq t \leq t_{max,1}$

$$S_1 = Q_{1,max,v} \operatorname{sen} \left[\pi Ka (t - t_{sr}) / TD \right] \quad (6)$$

$$Ka = TD / \left[2 (t_{max,1} - t_{sr}) \right] \quad (7)$$

Para $t_{max,1} \leq t \leq t_{ss}$,

$$S_1 = Q_{1,max,v} \operatorname{sen} \left[\pi / 2 \frac{(TD - (t - t_{sr}))}{(TD - (t_{max,1} - t_{sr}))} \right] \quad (8)$$

donde:

t_{sr} = es el tiempo en minutos de salida del sol

t_{ss} = es el tiempo en minutos de puesta del sol

$t_{max,1}$ = es el tiempo en minutos en el que ocurre la máxima irradiancia $Q_{1,max,v}$

TD = es la longitud del día ó máximo tiempo de asoleamiento (minutos)

Se obtienen ecuaciones similares al cambiar el subíndice 1 por 3, para calcular la irradiancia sobre la pared 3 (S_3).

Coefficiente de transferencia de calor en la superficie exterior.

La transferencia neta de calor a través de la superficie exterior de una sección de una edificación incluye la irradiancia que absorbe la superficie de acuerdo a sus propiedades ópticas y la convección debido al viento, el cual se determina como (Duffie and Beckman, 1980):

$$h_w = 5.7 + 3.8v \quad (9)$$

siendo h_w , coeficiente de transferencia de calor por convección debido al viento, cuya velocidad es v

La temperatura de los nodos externos se determina resolviendo, para cada paso de tiempo, las siguientes ecuaciones:

$$-k_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} = S_1 \alpha_s - h_w (T_{pared} - TF) \quad \text{Pared izquierda} \quad (10)$$

$$-k_3 \frac{\partial T}{\partial x_3} = S_3 \alpha_s - h_w (T_{pared} - TF) \quad \text{Pared derecha} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0 \quad \text{Piso y techo adiabático} \quad (12)$$

donde α_s es la absorptividad solar de la superficie.

2.3. Detalles Computacionales

Las ecuaciones gobernantes fueron resueltas numéricamente utilizando una técnica de diferencias finitas, cuyos detalles se encuentran bien descritos en Patankar (1980). Básicamente, dichas ecuaciones de conservación se escriben como una ecuación diferencial general de la siguiente forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \operatorname{div}(\rho\bar{u}\phi) = \operatorname{div}(\Gamma_\phi \operatorname{grad} \phi) + S_\phi \quad (13)$$

donde:

ϕ = es la variable dependiente de interés

Γ_ϕ = es el coeficiente de difusión correspondiente a ϕ

El método de solución está basado en la aproximación de los volúmenes de control y las ecuaciones de conservación se reducen a un conjunto de ecuaciones discretizadas algebraicas cuya forma general es:

$$a_p \phi_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (14)$$

donde:

ϕ_p = valor desconocido de en un punto nodal de la red

a_p = coeficiente de la variable dependiente en el punto nodal considerado

a_{nb} = coeficiente de los nodos vecinos

ϕ_{nb} = valor de ϕ en un nodo vecino

El algoritmo "SIMPLE" (Patankar, 1980) fue utilizado para resolver el campo de flujo, el cual está ligado a la ecuación de energía a través de las fuerzas de cuerpo.

TABLA 1
DATOS METEOROLÓGICOS CORRESPONDIENTES AL
MES DE MAYO

Orientación	Dec.	Dif.	Q1,max,v	Tmax,1	Q3,max,v	Tmax,3	Qmax,h
	Grados (oC)	minutos	W/m	minutos	W/m	minutos	W/m
N-S	20.14	-42.6	281	750	268	750	510
E-O	20.14	-42.6	280	690	278	810	510
	TFmin	TFmax	TFmin	TFmax	Tavg	Tdp	Vwind
	Grados (oC)	Grados (oC)	minutos	minutos	Grados (oC)	Grados (oC)	mts./seg.
	25.18	31.34	360	840	28.3	24.62	3.26

Fuente: Almaro (1993)

TABLA 2
DATOS METEOROLÓGICOS CORRESPONDIENTES AL
MES DE AGOSTO

Orientación	Dec.	Dif.	Q1,max,v	Tmax,1	Q3,max,v	Tmax,3	Qmax,h
	Grados (oC)	minutos	W/m	minutos	W/m	minutos	W/m
N-S	9.97	-47.4	264	750	285	750	580
E-O	9.97	-47.4	307	690	320	870	580
	TFmin	TFmax	Tmin	Tmax	Tavg	Tdp	Vwind
	Grados (oC)	Grados (oC)	minutos	minutos	Grados (oC)	Grados (oC)	mts./seg.
	25.09	32.85	360	660	29	24.08	3.61

Fuente: Almaro (1993)

TABLA 3
PROPIEDADES TÉRMICAS Y ÓPTIMAS DE LOS MATERIALES USADOS EN PAREDES EXTERIORES

MATERIALES		SECC. TRANSVERS.		PROPIED.	PROPIEDADES TÉRMICAS					
MATERIALES	TIPOS	ESPORES		OPTICAS	CONDUCTIVIDAD		CALOR ESPECÍFICO		DENSIDAD	
		metros		REFLECTIV.	k=W/moC	Cp=J/Kg.K		p=Kg./m		
		Revestim.	Mortero	1-os	Revestim.	Mortero	Revestim.	Mortero	Revestim.	Mortero
BLOQUES DE ARCILLA		0.15			0.2366		pCp=405853.6 J/m		pequiv=461.60	
FRISO BASE		0.015		0.33*	0.698		1005		1005 1800	
PINTURA	Blanco			0.72						
	Azul			0.32						
	Negro			0.07						
OTROS	Tablilla roja	0.008	0.007	0.3*	1.279	0.66	879	795	1460	1600
REVESTIMIENTOS	Tablilla crema	0.008	0.007	0.63^	1.279	0.66	879	795	1460	1600
	Mármol negro	0.017	0.02	0.07	2.9	0.53	800	1000	2590	1570
	Travertino	0.017	0.02	0.63	2	0.53	802	1000	2500	1570
	Granito proyect.	0.005	0.01	0.72	0.87	0.66	840	795	2086	1600

Fuentes: González (1992), *Ashrae, (1977), Sharma and Sharma (1988), ^calculada

Estas han sido tratadas de acuerdo a la aproximación de Boussinesq (Gray and Giorgini, 1976), donde se considera que los cambios de la densidad con la temperatura sólo son importantes en el término de fuerzas de cuerpo.

En la solución del campo de velocidad, la región sólida (paredes) fue tratada utilizando una viscosidad elevada en los nodos correspondientes. Se seleccionó un paso de tiempo de 30 segundos, suficientemente pequeño para satisfacer conservación de la masa en cada volumen de control para cada iteración. Todos los cálculos fueron realizados utilizando una malla no uniforme de 30x14, con espaciamento más fino en las paredes en la dirección "x" (ver figura 1), de tal forma que se toma en cuenta directamente toda la composición de la pared (friso base interior, bloque de arcilla, friso base exterior, pegamento del revestimiento exterior y el revestimiento exterior propiamente dicho). Se seleccionó esta malla después de correr el programa con una malla no uniforme de 24x14 para la construcción básica (friso base interior y bloque de arcilla), y trabajando los diferentes revestimientos con resistencias equivalentes, lo cual permitía hacer el programa más accesible al usuario. Pero al comparar los resultados con la malla seleccionada, que incluye todos los materiales, se obtuvieron coeficientes de variación del 65 %, 28 % y 85 % para los casos con friso base, tablilla roja y pintura blanca, respectivamente.

Los casos analizados corresponden a una sección rectangular de un entrepiso cuyas dimensiones son 3.60m x 2.40m, y para algunos revestimientos convenientemente seleccionados, de 7.20m x 2.40m, para estudiar el efecto de variar la relación de aspecto. Estas dimensiones corresponden a valores a escala real normalmente usados en este tipo de edificaciones. El tiempo de computación es 0.73 segundos por iteración en una PC 486-33

compatible. Esto implica que la simulación del comportamiento térmico de las secciones consideradas durante tres días consecutivos toma 1.76 horas.

3. CASOS SIMULADOS

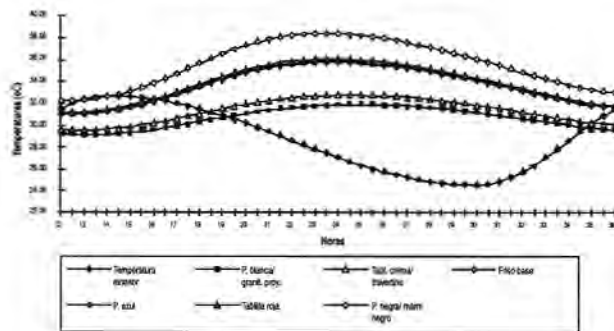
Para evaluar el comportamiento térmico en una sección rectangular de un entrepiso, se realizaron 4 series de simulación, bajo las condiciones climáticas del mes de Mayo y Agosto (meses desfavorables) en Maracaibo, las cuales se describen a continuación:

3.1. SERIE 1: Comparación de algunos revestimientos.

Bajo las condiciones climáticas de Mayo, se comparan 9 revestimientos mediante la evaluación de una sección rectangular con un espacio aire de 2.40 m. de altura por 3.60 m. de largo, en donde las paredes (exteriores) tienen una orientación Norte-Sur. Los casos simulados en esta primera serie son los siguientes:

- Caso 1. Friso base: Paredes construidas con bloques de arcilla roja con 3 cámaras de aire en la dirección "x" y 0.15 m. de espesor, con friso base exterior e interior sin pintar de 0.015 m. de espesor cada uno, y compuesto por una mezcla de cemento, arena y agua. En este caso, se simula el efecto de la configuración física básica de una pared construida con el sistema tradicionalmente empleado en la ciudad y con el cual se compararán los demás casos.
- Caso 2. Pintura blanca: Igual que el caso 1, pero con el friso base exterior pintado de blanco.
- Caso 3. Pintura azul: Igual que el caso 1, pero con el friso base exterior pintado de azul.
- Caso 4. Pintura negra: Igual que el caso 1, pero con el friso base exterior pintado de negro.

FIGURA 2
COMPARACIÓN DE LAS TEMPERATURAS INFERIORES
DE LOS REVESTIMIENTOS (N-S)



- Caso 5. Tablilla roja: Igual que el caso 1, pero las paredes están revestidas exteriormente con una tablilla de arcilla roja cocida al horno, de 0.008 m. de espesor, las cuales son pegadas al friso base exterior con un mortero en capa de 0.007 m. de espesor.
- Caso 6. Tablilla crema: Igual que el caso 4, pero la tablilla es elaborada con una arcilla de color crema-amarillento.
- Caso 7. Granito Proyectado: Igual que el caso 1, pero el revestimiento exterior, está elaborado con un mortero especial de 0.005 m. de espesor sobre el cual se proyecta una capa de piedra finamente picada (en tamaños pequeños) de granito blanco y cuyo espesor alcanza los 0.01 m.
- Caso 8. Travertino: Igual que el caso 1, pero se utiliza como revestimiento exterior, láminas de travertino (color crema claro) de 0.017 m. de espesor. Estas son pegadas al friso base exterior con una capa de cemento-arena de 0.02 m.
- Caso 9. Mármol negro: Igual que el caso 1, pero el revestimiento es de mármol de color negro.

3.2. SERIE 2: Relación de aspecto (dimensional).

En esta segunda serie sólo se modifica la dimensión en la dirección "x" de la sección rectangular de 3.60 m. a 7.20 m., para así evaluar el efecto térmico al cambiar las relaciones dimensionales. Por tal razón, se considera suficiente simular un sólo caso de los descritos para la serie 1. Estas dimensiones, correspondientes a los espacios y a las secciones transversales de los materiales citados, son frecuentes en el mercado local de la construcción.

3.3. SERIE 3: Efecto de la orientación de las paredes exteriores.

En esta serie se evalúan las mismas condiciones descritas en la serie 1, con la diferencia de que las paredes exteriores están orientadas al Este y Oeste, en vez de Norte y Sur. Esta evaluación se hace por lo menos con 3 casos representativos de situaciones extremas e intermedias obtenidas con los resultados de la serie 1.

3.4. SERIE 4. Efecto de la modificación de las condiciones climáticas exteriores.

En esta serie se analiza el efecto térmico interior de una sección igual a la descrita en la serie 1, pero bajo las condiciones climáticas del mes de Agosto (ver tabla 2) cuyos valores de temperatura exterior son los más elevados durante el año. Se simulan los mismos tres casos de la serie 3, al mismo tiempo, se comparan los efectos de las paredes en función de cuatros orientaciones francas (N-S y E-O).

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Serie 1:

Los resultados obtenidos en esta primera serie, son presentados en la figura 2, en la cual se observan las variaciones de las temperaturas interiores para todos los casos, y las variaciones de la temperatura exterior, en un tiempo continuo de simulación de 60 horas (7200 iteraciones), mostrándose aquellos obtenidos a partir del segundo día (24 horas), cuando el problema inestable se ha convertido en un problema periódico estable. Los valores de temperatura corresponden a un nodo central del espacio aire de la sección, el cual está ubicado a 1.8 m. con respecto a la pared 1 y a 1.10 m. con respecto a la superficie adiabática inferior (piso). De acuerdo a la distribución de temperaturas, en el espacio aire, no se observaron cambios apreciables en la dirección horizontal ni en la vertical, debido a que las superficies horizontales son adiabáticas. Se observa, en la misma figura, que cuando se utilizaron revestimientos exteriores con los mismos colores, los valores obtenidos de temperatura interior, son prácticamente iguales, correspondiendo los menores valores a los colores claros de los casos 2/7, seguidos por los casos 6/8; y en donde la secuencia creciente del comportamiento de los otros casos simulados, se corresponde con la secuencia de los valores de absorptividad determinados por Sharma and Sharma (1989). Esto se debe a que los espesores considerados para los casos 5, 6, 7, 8 y 9, son muy pequeños comparados con el espesor global de la pared, por lo tanto, las propiedades ópticas son determinantes en dicho comportamiento. Con el uso de revestimientos de colores claros, casos 2/7 y 6/8, y en función del caso 1, se obtuvieron porcentajes de reducción de carga, del 27 % y 20 %, respectivamente, cuando las temperaturas interiores alcanzan los mínimos valores, y del 33 % y 25 % cuando los valores de temperatura interior son los máximos alcanzados. Por el contrario, en los casos 3, 5 y 4/9, se obtuvieron incrementos en las cargas térmicas de 0.3 %, 2 % y 18%, para las temperaturas mínimas alcanzadas, y de 0.9 %, 2.5 %, y 22 %, para las máximas alcanzadas en los respectivos casos. Se obtuvo además, retrasos térmicos con respec-

to a las temperatura exterior de aproximadamente 7 horas y 10 horas, cuando se alcanzan las mínimas y máximas temperaturas, respectivamente.

La figura 3, muestra dos periodos importantes a considerar. El primero, donde las temperaturas interiores son menores a las exteriores, y es conveniente cerrar las ventanas y ventilar interiormente. Para el caso 2/7, se encuentra ubicado entre las 10.5 y 19 horas y una disminución de 4 °C; seguido por el caso 6/8, con 7 horas aproximadamente y 3 °C; luego los casos 1, 3, 5, con 3.5 horas y 1.4 °C; y por último, el caso 4/9 con 1.5 horas y 0.2°C. El segundo periodo, donde las temperaturas interiores son mayores a las exteriores, y es conveniente la ventilación con aire exterior. En este caso, la menor duración corresponde precisamente al caso 2/7 con 16 horas, y al caso 6/8 con 18 horas y un promedio de temperatura interior mayor a la temperatura exterior (ti>te) de 4 °C y 5 °C por encima, respectivamente. La mayor ocurre, como era de esperarse, en el caso 4/9 (color negro), con 23 horas de duración y 8 °C promedio.

Serie 2:

En esta serie, se simuló un tiempo continuo de 72 horas, mostrándose los resultados a partir de las últimas 24 horas. En la figura 4, se observa la diferencia en el comportamiento térmico entre dos secciones de diferentes dimensiones, para la configuración descrita en el caso 6 (serie 1). Con esta nueva relación dimensional se obtuvo que la amplitud térmica se redujo en 2 °C (de 3 °C a 1 °C); reduciéndose por lo tanto, el valor máximo de 32.95 °C a 31.75 °C (1.2 °C), y aumentando el valor mínimo, de 29.96 °C a 30.73 °C (+0.77 °C). Además, el retraso térmico en relación a la anterior dimensión, es de 0 horas y 1 hora para los valores máximos y mínimos de temperaturas, respectivamente alcanzados. Este resultado era esperado debido a que se aumentó la masa de aire.

Serie 3:

Los resultados de esta serie se expresan en las figuras 5, 6, 7 y 8 para el mismo tiempo de simulación de la serie 2, pero publicados a partir del tercer día. En la Figura 5, se comparan las temperaturas interiores de los casos 2/7, 5 y 4/9 obtenidas para dos orientaciones de la sección (Norte-Sur y Este-Oeste) y para las condiciones climáticas del mes de Mayo. Se observa que no hay variaciones en las temperaturas interiores, a pesar de existir diferencias en el calor transferido ($Q=w/m^2$) a través de cada pared de la sección, en las cuatro orientaciones antes mencionadas.

En la figura 6, se compararon el calor transferido por la pared Norte (pared 1) y pared Sur (pared 3), resultando que las paredes orientadas hacia el Norte, son las que obtienen los mayores valores para los periodos de ganancia de calor (entre las 9 y 20 horas aproximadamente),

FIGURA 3
DIFERENCIA ENTRE LAS TEMPERATURAS INTERNAS Y EXTERNAS DE TODOS LOS CASOS (N-S)

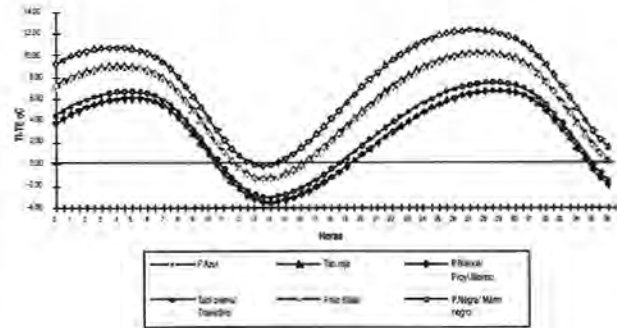


FIGURA 4
EFECTO DE LA RELACION DE ASPECTO EN EL COMPORTAMIENTO TÉRMICO

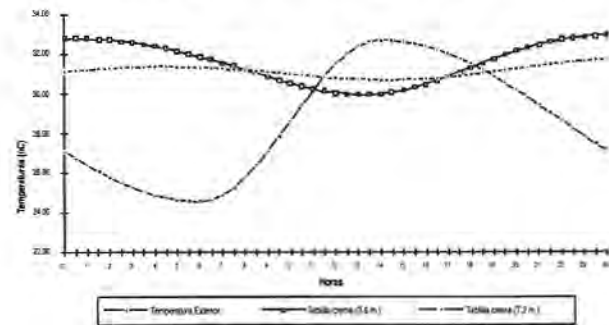


FIGURA 5
COMPARACIÓN DE LAS TEMPERATURAS INTERNAS DE TRES CASOS CON DOS ORIENTACIONES DE LA SECCIÓN (N-S; E-O)

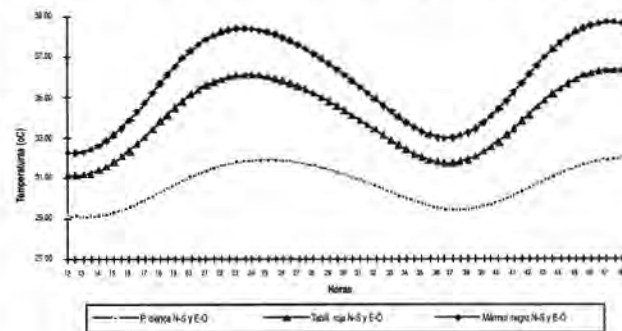


FIGURA 6
COMPARACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR DE TRES CASOS CON ORIENTACIÓN N-S

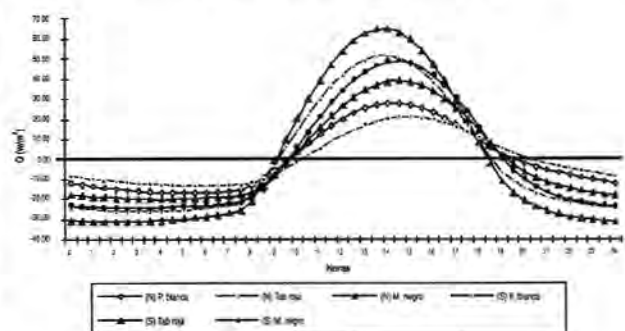


FIGURA 7
COMPARACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR DE TRES CASOS CON ORIENTACIÓN E-O

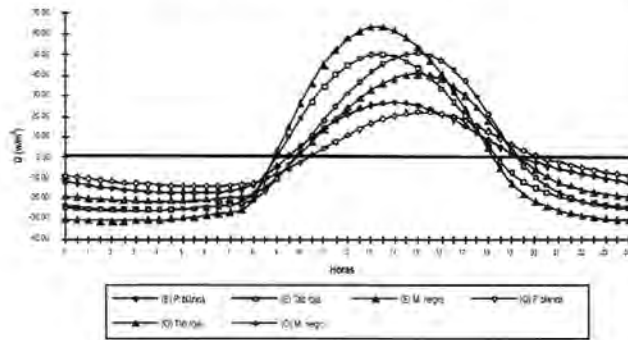


FIGURA 8
COMPARACIÓN DE LAS TEMPERATURAS INTERIORES DE TRES CASOS CON ORIENTACIONES DE LA SECCIÓN (N-S Y E-O). AGOSTO. SERIE 4

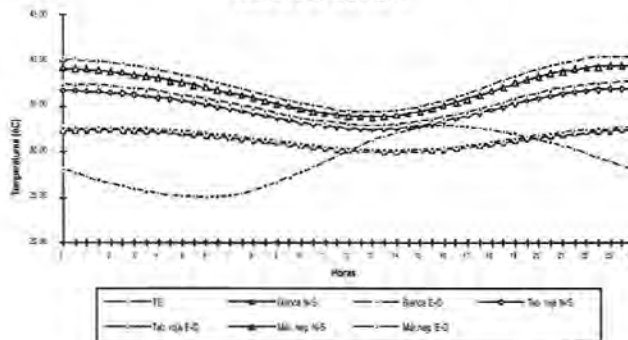


FIGURA 9
COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS INTERIORES BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS (AGOSTO Y MAYO) Y CON LA MISMA ORIENTACIÓN NORTE-SUR

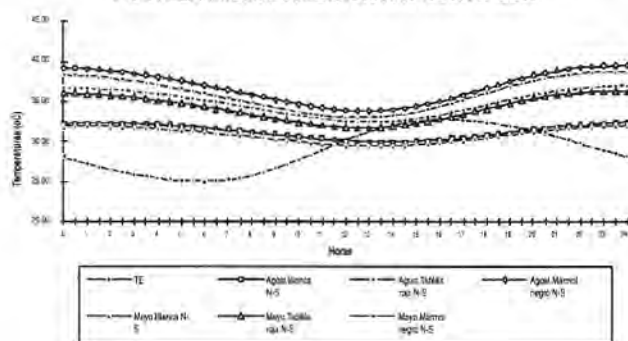
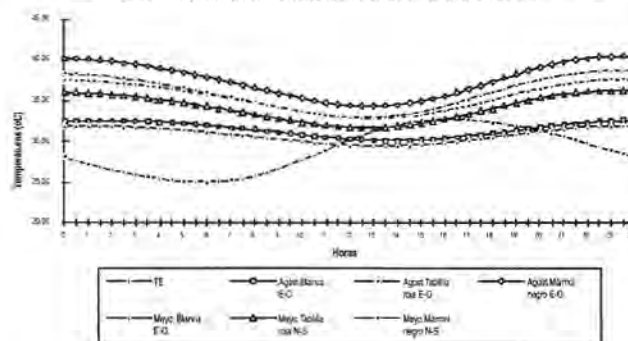


FIGURA 10
COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS INTERIORES BAJO DIFERENTES CONDICIONES CLIMÁTICAS (AGOSTO Y MAYO) Y CON LA MISMA ORIENTACIÓN ESTE-OESTE



y los valores mínimos para los periodos de pérdidas de calor (entre 0 y 9 horas y entre las 19 y 24 horas), situación que es inversa con la orientación Sur. En este sentido, la menor cantidad de calor se recibió a través de la pared Sur del caso 2/7 (P. blanca), con 13.09 w/m² promedio; seguida por la pared Norte del mismo caso, con 16.96 w/m² promedio; luego, sigue la pared Sur del caso 5 (Tablilla roja), con 24.66 w/m² promedio. Las mayores pérdidas de calor se obtienen en la pared Norte del caso 4/9 (Mármol negro), con -25.08 w/m² promedio, y en la pared Norte del caso 5 (Tablilla roja), con -20.45 w/m² promedio.

En la Figura 7, se observa la transferencia de calor a través de las paredes orientada Este-Oeste. En este caso, las menores ganancias de calor, se obtuvieron en las paredes con orientación Oeste, alcanzando el caso 2/7, el menor valor promedio (13.54 w/m² en las ganancias y -8.11 w/m² en las pérdidas), seguida por la pared Este del mismo caso (16.64 w/m² y -10.49 w/m²), y por la pared Oeste del caso 5 (25.64 w/m² y -15.63 w/m²).

Serie 4:

En la figura 8, se presentan las temperaturas interiores obtenidas bajo las condiciones climáticas de Agosto. A diferencia de aquellos valores obtenidos para el mes de Mayo, pueden observarse valores ligeramente mayores para la orientación E-O con respecto a la N-S, a saber, para los casos 2/7, 5 y 4/9 corresponden incrementos de 0.18 °C; 0.43 °C y 0.59 °C, para las temperaturas mínimas y de 0.32 °C, 0.8 °C y 1.05 °C para las temperaturas máximas, respectivamente. Este comportamiento se debe a que, para Mayo, el promedio de la irradiancia vertical de la pared Norte y la pared Sur, es casi igual al promedio para las paredes Este y Oeste (275 w/m² y 279 w/m²); no ocurriendo lo mismo para Agosto, donde los promedios son ligeramente diferentes y superiores para la orientación E-O (290 w/m² para la N-S y 314 w/m² para la E-O).

Las figuras 9 y 10, presentan la comparación de las temperaturas interiores obtenidas para Mayo y para Agosto con orientaciones N-S y E-O, respectivamente. En ambas figuras, las temperaturas interiores son ligeramente superiores para Agosto, correspondiendo el siguiente orden, de mayor a menor temperatura: primero, el caso 4/9 (Pintura negra/mármol negro), luego el caso 5 (tablilla roja) y por último el caso 2/7 (Pintura blanca). Las diferencias de Agosto respecto a Mayo, en relación a las temperaturas mínimas y máximas alcanzadas, son también muy pequeñas, alcanzando para la orientación N-S una diferencia máxima de 0.8 °C y para la E-O una diferencia máxima de 1.5 °C. En cuanto a los retardos térmicos, se obtiene que para Agosto con respecto a Mayo y en las dos orientaciones, los periodos entre las temperaturas mínimas de los diferentes casos, se incrementan en media hora, exceptuando el caso 5. E-O (una hora); y para

el período entre las temperaturas máximas, se reduce en 2 y 2.5 horas respecto a Mayo.

Los flujos de calor obtenidos a través de las cuatro orientaciones de las paredes, en Agosto, se muestran en las figuras 11 y 12. Puede notarse que las menores ganancias de calor y por lo tanto, las menores pérdidas se obtuvieron con la orientación Sur para cada caso, y el orden obtenido en conjunto es el siguiente: el caso 2/7. (Pintura blanca.Sur), presentando la menor ganancia de calor con un valor promedio de 11.89 w/m² en un total de 10 horas y un valor máximo de 19.57 w/m² (3.5 pm); le sigue el caso 5. (Tablilla roja. Sur), con 23.44 w/m² promedio en 9.5 horas y un valor máximo de 37.83 w/m² (2.5 pm). Para la orientación E-O (figura 12), los menores valores corresponden a la orientación Oeste, para cada caso e igualmente en conjunto, el caso 2/7 (pintura blanca), presentó la menor ganancia de calor con 13.83 w/m² en 9.5 horas y un valor máximo promedio de 22.65 w/m² (4 pm); seguido por el mismo caso, con orientación Este, cuyo valor promedio es de 15.36 w/m² en 10 horas, alcanzando un valor máximo de 24.65 w/m² (2.5 pm). Por último se encuentra el caso 5. (Tablilla roja. Oeste) con 27.78 w/m² promedio en 9 horas y con un valor máximo de 43.33 w/m² (4 pm).

4. CONCLUSIONES

La utilización del modelo de simulación permitió evaluar cuantitativamente el efecto único de las paredes, combinado con diferentes revestimientos (localmente empleados), sobre el comportamiento térmico de una edificación de varios pisos, comparando secciones bidimensionales a escala real. Los resultados obtenidos en las tres series de simulación, bajo las condiciones pre-establecidas, permiten concluir lo siguiente:

1. Lo que determina el comportamiento térmico de una sección de un entrespacio, cuando los espesores de los revestimientos son muy pequeños (hasta de 2 cms de espesor), es el color superficial de las paredes exteriores. En la medida que dicho color sea más claro, cercano al blanco, aumentarán los porcentajes de reducción de carga térmica. Esto significa que ante la opción de colocarle algún tipo de revestimiento a la configuración básica de una pared exterior (caso 1), si se busca reducir los consumos energéticos, se obtendrán mejores resultados utilizando aquellos, cuyos colores sean claros (blanco: 33% y crema: 25% para las temperaturas máximas alcanzadas).

En relación al uso de la tablilla roja como revestimiento exterior, se concluye que el porcentaje de carga se incrementa en un 2.5%, respecto a la pared con friso base exterior sin pintar (caso 1); en un 27.3% con respecto a la tablilla color crema (caso 6), y en un 35%, respecto a la pared pintada de blanco.

FIGURA 11
COMPARACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR DE LOS TRES CASOS CON ORIENTACIÓN N-S. MES: AGOSTO

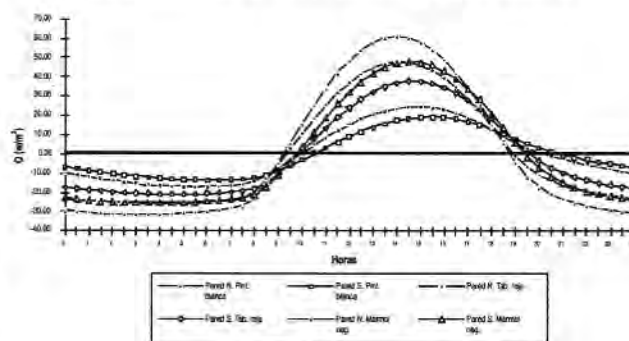
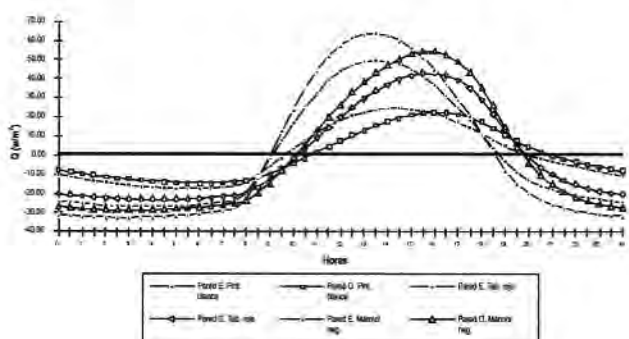


FIGURA 12
COMPARACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR DE LOS TRES CASOS CON ORIENTACIÓN E-O. MES: AGOSTO



2. Con el uso de colores claros (caso 2/7 y 6), se obtienen periodos de tiempo mayores en donde la temperatura interior es menor a las exterior, alcanzando hasta 9 horas de duración para Mayo. Este periodo coincide justamente con el periodo de horas críticas (mayor temperatura exterior e irradiancia). Por tal razón, se recomienda cerrar las ventanas y ventilar internamente durante dicho periodo, y ventilar con aire exterior fuera del mismo. Para Mayo, este periodo se encuentra comprendido como sigue: caso 2/7 (pintura blanca) de 10:30 pm a 7 pm; caso 6 (tablilla crema) de 11 am a 6:30 pm y el caso 5 (tablilla roja) de 12 del mediodía a 4 pm.

3. Aumentando al doble, la dimensión en la dirección "x" en una sección de un entrespacio, se aplanan la curva de temperatura interior, obteniéndose una reducción de aproximadamente 2 °C en la amplitud térmica, y de 1 °C en la temperatura máxima alcanzada. Con ello se concluye que cuando se aumenta el volumen de aire del espacio interior, las variaciones de temperatura interna son menores.

4. Para el mes de Mayo, las temperaturas interiores no varían al modificar la orientación de la sección (N-S y E-O), pero si varían las ganancias o pérdidas de calor a través de las paredes; en cambio para el mes de Agosto, las temperaturas interiores varían con la orientación, obteniéndose ligeras reducciones en la orientación Nor-

te-Sur de la sección. En Agosto, las temperaturas interiores además, resultaron ser ligeramente superiores a las obtenidas en Mayo, en las dos orientaciones de la sección, siendo tales diferencias menores de 1.5 °C.

Al comparar los retrasos térmicos de los diferentes casos obtenidos para Mayo y para Agosto, en las dos orientaciones de la sección, se obtiene que para Agosto es 0.5 horas mayor respecto a Mayo para las temperaturas mínimas alcanzadas y aproximadamente 2.5 horas menor para las temperaturas máximas alcanzadas.

En ambos meses, las menores ganancias de calor se obtienen cuando las paredes están orientadas al Sur y al Oeste, debido a que en estas orientaciones la irradiancia vertical es menor. Las paredes orientadas al Sur en relación al Norte, para Mayo, logran reducir el flujo de calor en 4 w/m² (pintura blanca. caso 2/7), en 8 w/m² (tablilla roja. caso 5), y en 12 w/m² (pintura negra. caso 4/9) y para Agosto en 3 w/m² (caso 2/7), en 8 w/m² (caso 5) y en 8.4 w/m² (caso 4/9). Para las paredes orientadas al Oeste, con respecto al Este, se alcanzan reducciones en el flujo de calor de 4.75 w/m², 9.64 w/m² y 12.48 w/m², respectivamente para el mes de Mayo y de 1.5 w/m², 5 w/m² y 4.5 w/m², respectivamente para el mes de Agosto.

NOMENCLATURA

a_p :	Coefficiente del punto central de la ecuación de discretización.
a_{nb} :	Coefficiente de los nodos vecinos en la ecuación de discretización.
b :	Término independiente de la ecuación de discretización.
c :	Calor Específico a presión constante (J/Kg K).
div :	Operador vectorial divergencia.
h :	Entalpía específica (ecuación 3).
h_w :	Coefficiente de transferencia de calor por convección debido a la velocidad del viento (w/m ² K).
Ka :	Constante definida por ecuación 12.
k :	Conductividad térmica (W/m K).
P :	Presión (ecuación 2).
$Q_{1\text{máx},v}$:	Máxima irradiancia sobre la pared 1 (w/m ²).
S_1 :	Irradiancia global sobre la pared 1 (w/m ²).
S_3 :	Irradiancia global sobre la pared 3 (w/m ²).
Sh :	Término fuente en ecuación 3.
TD :	Longitud del día en minutos ó tiempo de asoleamiento.
TF :	Temperatura exterior.
T_{pared} :	Temperatura de un nodo en la pared.
t :	Tiempo del día en minutos.
$t_{\text{máx},i}$:	Tiempo en minutos al cual ocurre la máxima irradiancia sobre la Pared 1.
t_{sr} :	Tiempo de salida del sol en minutos.
t_{ss} :	Tiempo de puesta del sol (min.).
\bar{u} :	Vector velocidad.
u_i :	Componente de la velocidad en la dirección i .
v :	Velocidad del viento (m/s).
x_i :	Coordenada axial "i".
α_s :	Absortividad solar de la superficie.
ϵ_s :	Emisividad hemisférica de superficie.
ϕ_p, ϕ_{nb} :	Propiedad dependiente genérica en el punto central y vecino, respectivamente.
μ :	Viscosidad (ecuación 2).
ρ :	Densidad (Kg/m ³).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMAO DE H.,N. (1994), *Un modelo de temperatura ambiente e irradiancia sobre superficies en Maracaibo*, Rev. Téc. Ing. Zulia, Aceptado para publicación.
- ALMAO DE H.,N. AND RINCÓN, J. (1993), *Alternative designs for passive cooling homes for Venezuela*, ASME Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 115, 161-168.
- BANZAL, N. K., GARG, S. N. AND KOTHARI, S. (1992), *Effect of Exterior Surface Colour on the Thermal Performance of Buildings*, Building and Environment, Vol. 27, No 1, 31-37.
- DUFFIE, J. A., AND BECKMAN W. (1980), *Solar Engineering of Thermal Processes*, J. Wiley and Sons, New York.
- GIVONI, B., MAN (1976), *Climate and Architecture*, Applied Science Published Ltd., London.
- GONZÁLEZ, E. (1989), *Evaluación experimental de sistemas pasivos de enfriamiento en Maracaibo*, Universidad del Zulia, CONDES.
- GONZÁLEZ, E. (1992), *Evaluation de systèmes passifs de rafraichissement en climat tropical humide et étude des matériaux pour la conception architecturale bioclimatique, Rapport de recherche en énergétique*, CENERG-EMP.
- GRAY, D. AND GIORGINI, A. (1978), *The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases*, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 19.
- PATANKAR, S.V. (1980), *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Mc. Graw-Hill, New York.
- SHARMA, V. C. AND SHARMA A. (1989), *Solar Properties of Some Building Elements*, Energy, Vol 14, No 12, 805-810.