

ÍNDICES DEDUCTIVOS DE CONFORT TÉRMICO Y SU ADAPTACIÓN PARA ESPACIOS ABIERTOS VEGETADOS EN ZONAS ÁRIDAS. Casos de estudio: Cañones urbanos forestados.

M. A. Ruiz¹, E. N. Correa².

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (LAHV - INCIHUSA)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Centro Científico y Tecnológico – CCT Mendoza
C.C.131 C.P. 5500 – Mendoza. Tel. 0261-5244054 – Fax 0261-524 e-mail: aruiz@mendoza-conicet.gov.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta un estudio comparativo entre dos modelos deductivos de confort térmico, identificando cuál de ellos puede ser usado apropiadamente para estimar o predecir el confort térmico en espacios abiertos vegetados, de ciudades de zonas áridas, cuya configuración se corresponde con el esquema de “ciudad oasis”. De modo específico se compara el grado de confort térmico alcanzado en tres configuraciones de canales viales forestados, calculados a partir del modelo COMFA y del índice PMV. Los resultados muestran que las discrepancias más importantes entre ambos están asociadas a los algoritmos utilizados por cada uno de los métodos para la estimación de los términos intervinientes en el balance de energía. En este sentido el método COMFA por ser inicialmente concebido para los espacios abiertos posibilita una representación más detallada de los intercambios radiativos y convectivos. Por ello se propone tomar el valor de la carga térmica L en el índice PMV igual al balance de energía S del modelo COMFA a modo de homologar los resultados.

Palabras clave: confort térmico, espacios abiertos, COMFA, PMV.

INTRODUCCIÓN

Antecedentes

El confort térmico en espacios abiertos ha sido estudiado mediante diversos métodos y existen modelos tanto inductivos como deductivos para su cuantificación. Trabajos previos (Ruiz et al., 2009) destacan que para intervenir sobre las estrategias de diseño urbano, es necesario recurrir al empleo de los métodos deductivos que permiten evaluar con mayor precisión las interrelaciones entre las variables climáticas, morfológicas y forestales sobre el balance térmico del cuerpo humano. Dentro de los métodos deductivos disponibles, dos índices aparecen predominantemente y han sido extensamente utilizados en la bibliografía internacional para estimar el confort en espacios abiertos ellos son: el Predicted Mean Vote (PMV) (Fanger, 1972; ISO, 2005), y el método Fórmula de Confort o COMfort Formula (COMFA) (Brown y Gillespie, 1995). El PMV surge como un índice de confort para espacios interiores cuyo algoritmo se adapta posteriormente a los espacios exteriores, mientras que el COMFA es pensado desde su concepción como un índice para espacios abiertos.

Para el caso particular de los espacios abiertos “vegetados”—en esta categoría se consideran: cañones urbanos forestados, plazas, parques, patios y espacios verdes en general— la selección de un índice adecuado para cuantificar la calidad térmica del espacio es determinante debido a la complejidad de las interacciones radiativas entre la vegetación y las superficies duras; condicionada no sólo por la geometría del espacio y su relación con la posición del sol, sino también por las características espectrales de los componentes, recordando que en este caso la vegetación se comporta no como un cuerpo opaco sino como uno translúcido (es decir que además de su permeabilidad a la radiación solar es necesario trabajar con su trasmittancia y reflectancia en los distintos rangos del espectro radiante). Por lo que los balances térmicos en los espacios abiertos vegetados poseen mayor grado de complejidad que aquellos sin vegetación. Esto se intensifica cuando además trabajamos sobre espacios abiertos de zonas áridas donde existen altos niveles de irradiancia y alta frecuencia de días claros, como es el caso del área de estudio, el Área Metropolitana de Mendoza (AMM). Para reflexionar sobre las directrices que deben regir el diseño morfológico tanto de canales viales, como plazas y parques, en este contexto es necesario contar con indicadores confiables.

Objetivo

El fin de este estudio es comparar dos modelos deductivos de confort térmico para verificar su aplicabilidad en ciudades oasis de zonas áridas. Se evalúa el grado de confort térmico alcanzado en cuatro configuraciones de canales viales forestados típicos, calculado a partir del modelo COMFA y del índice PMV.

METODOLOGÍA

Casos de estudio

Basados en las características urbanas del AMM y los estudios previos (Correa et al., 2009; Ruiz et al., 2009), se decidió evaluar el grado de confort térmico durante el verano, en cuatro configuraciones de cañones urbanos de 20 m de ancho insertos en la trama de baja densidad edilicia. Tres de ellos están forestados con las especies predominantes en el área de estudio (*Platanus hispanica*, *Morus alba* y *Fraxinus excelsior*) y el cuarto no está forestado. Estos casos son representativos de las configuraciones urbanas típicas de la ciudad.

¹ Becaria Doctoral ANPCYT

² Investigador CONICET

Modelos de confort

Brown y Gillespie (1995), desarrollaron la Fórmula de Confort o COMfort Formula (COMFA), método que consiste en seguir la fórmula básica que expresa el balance de energía de una persona en un ambiente abierto.

$$S = M + R_{abs} - Conv - Evap - TR_{emitida} \quad (1)$$

Donde:

M : energía metabólica producida por el organismo
 R_{abs} : radiación solar y terrestre absorbida
 $Conv$: calor sensible perdido o ganado por convección
 $Evap$: pérdida evaporativa de calor
 $TR_{emitida}$: radiación terrestre emitida

Cuando el balance S es cercano a cero, puede esperarse que una persona se sienta térmicamente confortable. Si el balance presenta un gran valor positivo, la persona recibe más energía que la que pierde, por lo que podría haber sobrecalentamiento y estaría inconfortablemente caliente. Por otra parte, si el balance es negativo, la persona podría sentir frío. La tabla 1 muestra la sensación de confort humano relacionado con los valores del balance energético.

Balace (W/m ²)	Sensación
$S > -150$	La gente preferiría estar mucho más cálida
$-150 > S > -50$	La gente preferiría estar más cálida
$-50 > S > 50$	La gente preferiría no cambiar de estado
$50 > S > 150$	La gente preferiría estar más fresca
$150 < S$	La gente preferiría estar mucho más fresca

Tabla 1: La sensación de confort humano relacionado con los valores del balance S .

Por otro lado, el Voto Medio Estimado -PMV por sus siglas en inglés- (Fanger, 1972) es un índice que estima el valor medio de los votos de un gran grupo de personas en la siguiente escala de sensación térmica:

PMV	Sensación
+3	Muy cálido
+2	Bastante cálido
+1	Un poco cálido
0	Neutro
-1	Un poco fresco
-2	Bastante fresco
-3	Muy fresco

Tabla 2: La sensación de confort humano relacionado con los valores del índice PMV.

El índice PMV se basa en el balance de calor del cuerpo humano. El hombre está en balance térmico cuando la producción interna de calor del cuerpo es igual a las pérdidas de calor con el ambiente. En un ambiente moderado, el sistema termo-regulatorio humano trata automáticamente de modificar la temperatura de la piel y la secreción de sudoración para mantener el balance de calor. En el índice PMV la respuesta fisiológica del sistema termo-regulatorio ha sido relacionada con más de 1300 sujetos que emitieron su voto de sensación térmica (ISO, 2005). El PMV es dado por la siguiente ecuación:

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028) \times L \quad (2)$$

Donde:

$$L = \left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3.05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6.99 \times (M - W) - p_a] - 0.42 \times [(M - W) - 58.15] \\ 1.7 \times 10^{-5} M \times (5867 - p_a) - 0.0014 M (34 - t_a) \\ - 3.9 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \end{array} \right\} \quad (3)$$

Siendo L la carga térmica sobre el cuerpo, defendida como la diferencia entre la producción interna de calor y las pérdidas de calor hacia el ambiente (ASHRAE, 2004)

Y donde:

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \times (M - W) - I_{cl} \times \left\{ 3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times \left[(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4 \right] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (4)$$

$$h_c = \begin{cases} 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25} & \text{para } 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25} > 12.1 \sqrt{v_{ar}} \\ 12.1 \sqrt{v_{ar}} & \text{para } 2.38 \times |t_{cl} - t_a|^{0.25} < 12.1 \sqrt{v_{ar}} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1.00 + 1.290 \times I_{cl} & \text{para } I_{cl} \leq 0.078 \text{ m}^2 \text{K/W} \\ 1.05 + 0.645 \times I_{cl} & \text{para } I_{cl} > 0.078 \text{ m}^2 \text{K/W} \end{cases} \quad (6)$$

Siendo:

M es la tasa metabólica en W/m²
 W es el trabajo externo en W/m²
 p_a es la presión parcial del vapor de agua en Pa
 t_a es la temperatura del aire en °C
 t_{cl} es la temperatura de la superficie de la ropa en °C
 \bar{t}_r es la temperatura radiante media en °C
 f_{cl} es el factor de superficie de la ropa
 h_c es el coeficiente de transmisión del calor por convección en W/(m²K)
 I_{cl} es el aislamiento de la ropa en m²K/W
 v_{ar} es la velocidad relativa del aire en m/s

Hay que tener en cuenta que la Norma ISO 7730 (ISO, 2005) plantea que el valor del trabajo externo es igual a cero para la mayor parte de las actividades. Así mismo, la norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2004) considera que la carga térmica L sólo se ve influenciada por las pérdidas de energía hacia el ambiente y no atiende a las ganancias energéticas desde el ambiente. Estas aseveraciones pueden ser ciertas para recintos cerrados, pero difieren de la realidad en el caso de ambientes abiertos especialmente de zonas áridas, en donde la radiación solar juega un rol fundamental. Por lo que una de las correcciones para espacios abiertos consiste en asignarle un valor apropiado a la variable W.

La norma ISO 7730 (ISO, 2005) recomienda el uso del PMV, sólo para valores del mismo entre -2 y +2. Además, se recomienda aplicar el PMV cuando los parámetros se encuentran entre los siguientes límites: M : entre 46 y 232 W/m²; I_{cl} : entre 0 y 0.31 m²K/W; t_a : entre 10 y 30 °C; t_r : entre 10 y 40 °C; v_{ar} : entre 0 y 1 m/s; p_a : entre 0 y 2700 Pa. Dentro de este rango es mayormente recomendable que la humedad relativa se mantenga entre 30 y 70%. En la ciudad en estudio, con características de zona árida, los valores de las variables meteorológicas se encuentran comúnmente por fuera de los citados límites, particularmente durante el verano.

Para una mejor descripción de cada modelo y siguiendo el criterio propuesto por Monteiro y Alucci (2006), se ha elaborado la Tabla 3. La misma presenta las variables que incluye cada modelo y las referencias bibliográficas donde se encuentran descriptos en detalle. Los parámetros humanos toman diferentes nombres según el modelo de confort, por lo tanto se ha elaborado la tabla 4, la cual muestra los valores que han sido considerados para el desarrollo de cada ecuación.

		MODELOS	S (COMFA)	PMV
VARIABLES	climáticas	Radiación global	X	
		Radiación difusa	X	
		Altitud solar	X	
		Velocidad de viento	X	X
	micro-climáticas (urbanas)	Temperatura del aire	X	X
		Humedad relativa	X	X
		Temperatura superficial	X	
		Temperatura media radiante		X
		Temperatura de suelo	X	
		SVF	X	
		Albedo edilicio	X	
		Albedo del suelo	X	
	humanas	Tasa Metabólica	X	X
		Aislamiento de la ropa	X	
		Permeabilidad ropa	X	
		Aislación térmica de la ropa		X
		Temperatura de la piel	X	
		Emisividad piel	X	
		Albedo de la piel	X	
	forestales	Albedo de la ropa	X	
Permeabilidad		X		
REFERENCIAS			Brown y Gillespie, 1995; Gaetani et al., 2007	Fanger, 1972, ISO7730, ASHRAE 55 cap 8

Tabla 3: Variables involucradas en los modelos considerados en este estudio.

VARIABLES humanas	COMFA		PMV	
ROPA: Remera, pantalones largos, medias y zapatos	Aislamiento de la ropa (s/m)	75	Aislación térmica de la ropa (clo)	0.6
	Permeabilidad de la ropa	150	Aislación térmica de la ropa (m ² K/W)	0.095
ACTIVIDAD: Caminar a 5 km/h	Tasa metabólica (W/m ²)	200	Tasa metabólica (W/m ²)	200

Tabla 4. Valores de variables humanas utilizados para el modelo COMFA y el modelo Fanger.

Obtención de datos

Las variables necesarias para el cálculo de ambos índices fueron adquiridas mediante un sensor fijo en cada CVU desde mediados de diciembre de 2009 hasta febrero de 2010. Cada sensor del tipo H08-003-02 se ubicó a una altura de 1,6 m desde el nivel de la calle (Oke, 2004), dentro de una caja perforada de PVC blanco, con el objeto de evitar la irradiación y asegurar una adecuada circulación de aire. Las mediciones de temperatura, humedad relativa y humedad absoluta fueron programadas cada 15 minutos. Además, se monitorearon los CVU desde las 9:00 hasta las 21:00 del día 11 de enero de 2010. En esta campaña se registraron cada 15 minutos también las variables de: temperatura del aire, temperatura del punto de rocío, humedad relativa y absoluta, velocidad y dirección del viento, radiación solar, temperatura superficial y temperatura de globo. Los datos han sido procesados y evaluados estadísticamente a fin de presentar los resultados medios por hora para cada caso estudiado.

Los valores de permeabilidad a la radiación solar para las especies arbóreas estudiadas fueron tomados de investigaciones previas (Cantón et al., 1993). Los datos de temperatura superficial tanto de alrededores verticales y horizontales fueron medidos con un termómetro infrarrojo OMEGASCOPE tipo OS-XL. El factor de visión del cielo (o SVF por sus siglas en inglés) de cañones urbanos fue calculado a partir de imágenes digitales hemisféricas, tomadas usando una cámara digital Nikon CoolPix equipada con un lente ojo de pez. Procesadas mediante el software PIXEL DE CIELO desarrollado por nuestra unidad (Correa et al., 2005), el cual permite obtener el valor del parámetro (SVF), en condiciones de cielo despejado, forestación urbana intensa y ciudades con alta reflectividad típica en regiones semiáridas como es el caso de este estudio. Los parámetros considerados para el desarrollo del cálculo de S en cada caso de estudio son detallados en la tabla 5.

Variables	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Platanus acerifolia</i>	Sin árboles
Permeabilidad de cada especie en verano (%)	16.2	31.4	9.8	100
SVF	0.32	0.26	0.2	0.5
Albedo de construcciones	0.5	0.55	0.4	0.4
Albedo del suelo	0.1			

Tabla 5. Valores de variables para los diferentes casos evaluados con COMFA.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procesaron las variables climáticas, urbanas, humanas y forestales correspondientes a los casos evaluados, para ambos modelos predictivos seleccionados para el período de calentamiento durante la estación de verano. Los resultados se detallan en las figuras 1; 2; 3; y 4 y en las tablas 6; 7 y 8. Si bien ambos métodos describen la variación del grado de confort de los casos analizados, se encuentran diferencias entre los modelos según el procedimiento de cálculo. Tanto el balance de energía S como el índice PMV muestran que los máximos valores suceden alrededor del mismo horario, es decir, a las 17 hs aprox.

SIN ÁRBOLES								
Temp (°C)	T rocío (°C)	v viento (m/s)	Altitud solar	R glo (W/m2)	R dif (W/m2)	T sup (°C)	T suelo (°C)	S
26,73	11,27	0,7	23,82	570,8	181,1	28,9	32,93	159,4
27,91	13,22	0,65	36,3	773,1	104	30,45	35,83	241,8
28,8	13,06	0,65	48,9	925,4	97,99	32,55	38,83	238,7
30,51	12,94	0,7	61,34	1020	102,9	35,25	44,8	207,6
31,32	12,74	0,7	72,82	1060	107,4	38,55	49,13	211,5
32,34	12,41	1,07	79,1	1040	106,6	39	47,6	195,7
35,82	13,25	1,16	72,82	954,1	103	38,5	57,43	345,1
38,55	14,54	0,98	61,34	819	98,74	39,15	59,95	466,7
40,13	15,79	0,74	48,9	623,1	91,62	39,35	54,01	497,2
38,33	14,37	0,65	36,3	400,6	78,48	38,55	48,68	384,4
37	13,15	0,42	23,82	204,9	61,25	35,45	42,88	282,6
35,06	12,1	0,24	11,66	29,89	29,37	34,25	39,63	133,6
<i>F. excelsior</i>								
Temp (°C)	T rocío (°C)	v viento (m/s)	Altitud solar	R glo (W/m2)	R dif (W/m2)	T sup (°C)	T suelo (°C)	S
27,32	11,84	0,28	23,82	570,8	181,1	25,5	27,63	33,93
28,9	13,19	0,7	36,3	773,1	104	26,75	31,48	-13,60
29,5	12,89	0,7	48,9	925,4	97,99	27,5	31,9	-4,60
30,71	12,97	0,51	61,34	1020	102,9	28,85	35,18	81,15
32,04	12,82	0,65	72,82	1060	107,4	29,6	38,63	114,10
34,01	13,14	0,65	79,1	1040	106,6	30,15	33,88	134,70
36,91	13,98	0,61	72,82	954,1	103	32,15	39,73	221,90
38,89	14,72	0,42	61,34	819	98,74	32,15	38,23	266,40
36,79	13,78	0,51	48,9	623,1	91,62	30,75	37,1	205,90
36,79	13,56	0,28	36,3	400,6	78,48	31,9	37,45	200,80
35,92	12,53	0,23	23,82	204,9	61,25	31,45	35,33	160,20
34,43	12,03	0,01	11,66	29,89	29,37	30,25	32,85	91,84
<i>M. alba</i>								
Temp (°C)	T rocío (°C)	v viento (m/s)	Altitud solar	R glo (W/m2)	R dif (W/m2)	T sup (°C)	T suelo (°C)	S
26,63	11,52	0,47	23,82	570,8	181,1	25,3	27,68	57,57
28,31	13,47	0,7	36,3	773,1	104	27,15	31,25	12,10
29,7	12,27	0,51	48,9	925,4	97,99	28,7	35,35	101,90
30,41	13,06	0,74	61,34	1020	102,9	28,9	34,1	47,87
31,73	12,72	0,97	72,82	1060	107,4	30,9	36,6	73,22
32,76	12,74	0,74	79,1	1040	106,6	32,55	37,65	107,00
34,01	12,79	0,84	72,82	954,1	103	32,1	37,33	137,10
34,54	12,88	0,74	61,34	819	98,74	38,3	39,25	180,90
36,46	13,59	0,6	48,9	623,1	91,62	38,4	38,83	244,80
35,7	12,86	0,56	36,3	400,6	78,48	37,8	38,25	213,40
35,06	12,04	0,65	23,82	204,9	61,25	32,8	33,58	153,70
34,01	11,72	0,01	11,66	29,89	29,37	33,35	33,4	96,25
<i>P. hispanica</i>								
Temp (°C)	T rocío (°C)	v viento (m/s)	Altitud solar	R glo (W/m2)	R dif (W/m2)	T sup (°C)	T suelo (°C)	S
25,85	11,48	0,14	23,82	570,8	181,1	26,05	25,8	68,86
28,02	12,39	0,56	36,3	773,1	104	28,95	30,2	86,90
30,41	11,46	0,51	48,9	925,4	97,99	29,55	34,1	119,70
29,8	12,25	0,7	61,34	1020	102,9	30	33,55	82,52
30,92	12,02	0,7	72,82	1060	107,4	32,05	42,05	128,30
31,73	11,77	0,65	79,1	1040	106,6	31,35	36,75	139,80
32,76	11,55	0,56	72,82	954,1	103	33,15	44,05	180,70
33,7	12,02	0,46	61,34	819	98,74	31,65	34,4	156,30
34,33	12,39	0,51	48,9	623,1	91,62	37,05	42,2	202,10
34,01	12,33	0,56	36,3	400,6	78,48	35,4	39,15	177,50
34,01	11,6	0,19	23,82	204,9	61,25	32,05	33,45	141,20
33,07	11,2	0,33	11,66	29,89	29,37	33,15	35,4	121,60

Tabla 6: Resultados obtenidos de la aplicación del modelo COMFA a los casos de estudio seleccionados.

Los valores de S (balance térmico del COMFA) se encuentran por encima de 150 W/m^2 durante casi todo el periodo evaluado (la gente preferiría estar mucho más fresca), incluso S supera los 400 W/m^2 en el caso del canal no forestado, el cual presenta un gran factor de visión del cielo y por lo tanto grandes cantidades de radiación solar que llegan al CVU. En el resto de los canales viales forestados, los valores de S no son tan extremos. Sin embargo, las personas se encuentran en disconfort por calor desde las 15 hasta las 18 hs, con distintos grados de disconfort según el caso.

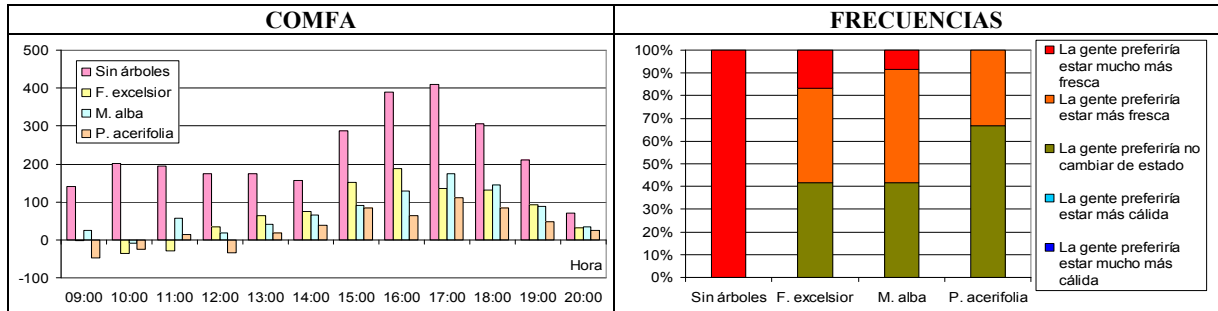


Figura 1: Valores del balance energético del modelo COMFA y frecuencias de cada rango de confort.

Para el análisis del PMV es necesario recordar que este índice ha sido desarrollado primeramente para la evaluación del confort en espacios interiores. Por lo que su aplicabilidad en espacios exteriores depende de la forma en la cual se cuantifica el término W en las ecuaciones 3 y 4.

La ecuación 3 puede escribirse también de la siguiente manera a modo de simplificación:

$$L = M - W - D - S - R_l - R_s - Rad - Conv \quad (7)$$

Donde:

- M : calor producido internamente
- W : calor ganado por radiación solar
- D : calor perdido por difusión a través de la piel
- S : calor perdido por sudor
- R_l : calor latente perdido por respiración
- R_s : calor sensible perdido por respiración
- Rad : calor perdido o ganado por radiación
- $Conv$: calor perdido o ganado por convección

En el primer caso para obtener el índice PMV se asigna como valor de la variable W , la radiación solar absorbida de acuerdo a las características geométricas y ópticas del espacio urbano. Los resultados se muestran en la figura 2 y en la tabla 7.

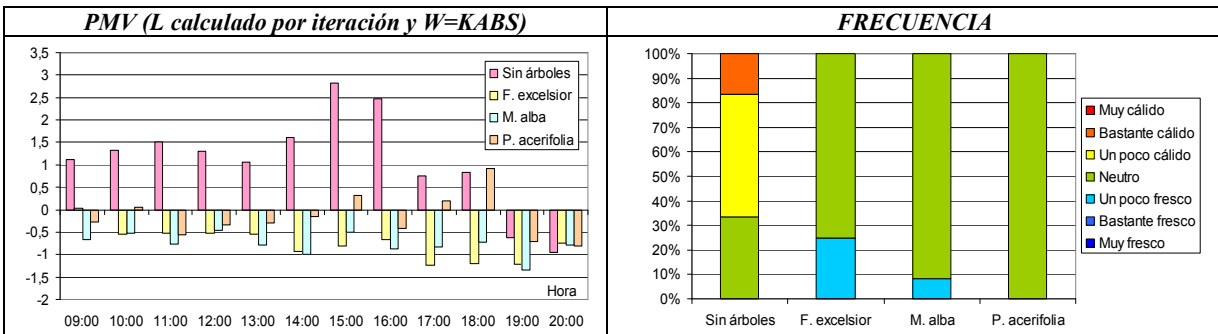


Figura 2: Valores de PMV y frecuencia de cada rango de confort, considerando $W =$ radiación solar absorbida.

En vistas de esta adecuación, los resultados del índice PMV cuando se toma al trabajo externo W igual a la radiación solar absorbida por el cuerpo humano ($Kabs$) sin considerar la radiación de onda corta que proviene de las superficies urbanas, se observa que sólo para el caso del canal vial no forestado (con grandes diferencias positivas entre la temperatura media radiante y la temperatura del aire) el PMV es positivo, experimentando durante gran parte del periodo valores mayores a +1 (disconfort). Mientras que los canales viales forestados se encuentran por debajo de 0 en distintos grados. Esto puede deberse a una subestimación de W y del coeficiente convectivo de transferencia de calor h_c , el cual toma valores característicos de interiores (ver tabla 7).

SIN ÁRBOLES							
Kabs (W/m^2)	pa (Pa)	ta ($^{\circ}\text{C}$)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	h _c	PMV
292,8	1337,00	26,73	37,95	0,70	25,01	10,12	1,116
277,2	1521,00	27,91	43,29	0,65	26,05	9,755	1,323
246,3	1505,00	28,80	48,95	0,65	26,84	9,755	1,508
210,2	1493,00	30,51	50,03	0,70	28,92	10,12	1,307
173,2	1474,00	31,32	49,39	0,70	30	10,12	1,052
148,6	1442,00	32,34	59,89	1,07	30,98	12,52	1,604
158,3	1524,00	35,82	77,64	1,16	33,98	13,03	2,829
174,1	1657,00	38,55	74,76	0,98	37,01	11,98	2,47
172,6	1796,00	40,13	54,19	0,74	39,88	10,41	0,7568
147,8	1639,00	38,33	54,74	0,65	37,81	9,755	0,822
105,2	1514,00	37,00	34,11	0,42	37,74	7,842	-0,6279
15,34	1413,00	35,06	33,04	0,24	36,12	5,928	-0,948

<i>F. excelsior</i>							
Kabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	h _c	PMV
109,8	1389,00	27,32	32,54	0,28	25,85	6,403	0,03619
80,72	1518,00	28,90	26,86	0,70	28,64	10,12	-0,5436
73,64	1488,00	29,50	28,74	0,70	29,26	10,12	-0,5126
69,5	1496,00	30,71	30,48	0,51	30,55	8,641	-0,5145
65,02	1481,00	32,04	32,14	0,65	32,04	9,755	-0,5352
60,78	1513,00	34,01	27,99	0,65	34,54	9,755	-0,9307
61,09	1598,00	36,91	33,76	0,61	37,64	9,45	-0,8111
62,2	1676,00	38,89	38,62	0,42	39,88	7,842	-0,6722
59,52	1577,00	36,79	26,32	0,51	38,01	8,641	-1,243
50,96	1555,00	36,79	28,54	0,28	38,42	6,403	-1,19
38,13	1453,00	35,92	27,91	0,23	37,63	5,803	-1,23
12,6	1406,00	34,43	29,40	0,00	29,83	0,1	-0,7485
<i>M. alba</i>							
Kabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	h _c	PMV
137,80	1360,00	26,63	17,09	0,47	26,21	8,295	-0,6654
113,40	1546,00	28,31	24,10	0,70	27,99	10,12	-0,5145
102,20	1429,00	29,70	22,29	0,51	29,7	8,641	-0,761
92,08	1505,00	30,41	29,49	0,74	30,22	10,41	-0,457
81,58	1472,00	31,73	25,93	0,97	31,9	11,92	-0,7912
73,66	1474,00	32,76	24,17	0,74	33,2	10,41	-0,9945
75,78	1478,00	34,01	34,30	0,84	34,16	11,09	-0,5056
79,68	1487,00	34,54	28,25	0,74	35,05	10,41	-0,8755
77,42	1558,00	36,46	31,88	0,60	37,17	9,373	-0,822
66,29	1485,00	35,70	33,50	0,56	36,25	9,055	-0,7221
48,55	1407,00	35,06	22,77	0,65	36,04	9,755	-1,35
12,26	1378,00	34,01	28,51	0,00	29,56	0,1	-0,7826
<i>P. hispanica</i>							
Kabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	h _c	PMV
77,26	1356,00	25,85	0,14	27,02	23,9	4,527	-0,276
55,05	1440,00	28,02	0,56	38,00	27,04	9,055	0,05874
50,41	1354,00	30,41	0,51	30,68	30,25	8,641	-0,5704
48,20	1427,00	29,80	0,70	33,99	29,42	10,12	-0,342
45,75	1405,00	30,92	0,70	36,25	30,6	10,12	-0,2977
43,15	1382,00	31,73	0,65	39,63	31,35	9,755	-0,1595
43,11	1362,00	32,76	0,56	48,02	32	9,055	0,3142
43,54	1405,00	33,70	0,46	37,59	33,75	8,207	-0,4258
41,48	1440,00	34,33	0,51	48,03	33,82	8,641	0,1993
35,52	1434,00	34,01	0,56	58,16	32,81	9,055	0,9178
26,73	1367,00	34,01	0,19	34,97	34,61	5,274	-0,7001
9,38	1331,00	33,07	0,33	32,87	33,5	6,951	-0,8185

Tabla 7: Resultados obtenidos de la aplicación del modelo Fanger (PMV) a los casos de estudio seleccionados, considerando $W =$ radiación solar absorbida.

En espacios abiertos forestados, la radiación solar decrece substancialmente debido a una disminución del factor de visión del cielo SVF pero se debe tener en cuenta que cada especie vegetal presenta distintos niveles de permeabilidad y trasmittancia de la radiación solar, esto contribuye al incremento de los aportes de radiación de onda larga (superficies urbanas), además del aporte de onda corta proveniente de la radiación solar. Por lo tanto, cuando se considera que el trabajo externo W es igual a la radiación total absorbida (onda corta y onda larga) los valores del índice PMV se tornan positivos para todos los casos, siendo esta valoración más afín a los resultados obtenidos por otras metodologías para la ciudad analizada (Ruiz et al., 2009). Sin embargo, esta aproximación no basta ya que el coeficiente convectivo de transferencia de calor h_c continúa siendo subestimado (ver tabla 8).

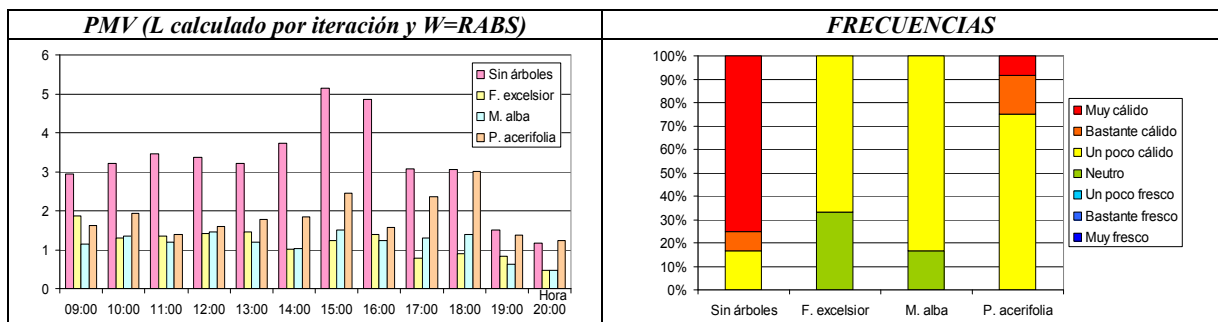


Figura 3: Valores de PMV y frecuencia de cada rango de confort, considerando $W =$ radiación total absorbida.

<i>SIN ÁRBOLES</i>							
Rabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	h _c	PMV
735,3	1337,00	26,73	37,95	0,7	23,77	10,12	2,953

733,4	1521,00	27,91	43,29	0,65	24,71	9,755	3,22
717	1505,00	28,8	48,95	0,65	25,46	9,755	3,466
708,6	1493,00	30,51	50,03	0,7	27,52	10,12	3,379
693,9	1474,00	31,32	49,39	0,7	28,53	10,12	3,216
666,4	1442,00	32,34	59,89	1,07	29,83	12,52	3,738
718,9	1524,00	35,82	77,64	1,16	32,79	13,03	5,138
751,1	1657,00	38,55	74,76	0,98	35,67	11,98	4,857
729,9	1796,00	40,13	54,19	0,74	38,35	10,41	3,079
680,3	1639,00	38,33	54,74	0,65	36,24	9,755	3,047
609,5	1514,00	37	34,11	0,42	35,82	7,842	1,508
503	1413,00	35,06	33,04	0,24	33,49	5,928	1,167
F. excelsior							
Rabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	hc	PMV
538,3	1389,00	27,32	32,54	0,28	23,77	6,403	1,868
525,2	1518,00	28,90	26,86	0,70	27,39	10,12	1,303
521,6	1488,00	29,50	28,74	0,70	28	10,12	1,349
531,9	1496,00	30,71	30,48	0,51	28,99	8,641	1,425
541,7	1481,00	32,04	32,14	0,65	30,64	9,755	1,452
525,7	1513,00	34,01	27,99	0,65	33,17	9,755	1,009
552,7	1598,00	36,91	33,76	0,61	36,14	9,45	1,246
551,3	1676,00	38,89	38,62	0,42	38,01	7,842	1,402
539,4	1577,00	36,79	26,32	0,51	36,38	8,641	0,7763
534,4	1555,00	36,79	28,54	0,28	36,05	6,403	0,8934
512,7	1453,00	35,92	27,91	0,23	35	5,803	0,835
475	1406,00	34,43	29,40	0,00	39,08	0,1	0,481
M. alba							
Rabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	hc	PMV
571,10	1360,00	26,63	17,09	0,47	24,68	8,295	1,153
562,90	1546,00	28,31	24,10	0,70	26,73	10,12	1,353
569,20	1429,00	29,70	22,29	0,51	28,12	8,641	1,197
556,10	1505,00	30,41	29,49	0,74	28,96	10,41	1,47
559,40	1472,00	31,73	25,93	0,97	30,78	11,92	1,182
559,80	1474,00	32,76	24,17	0,74	31,88	10,41	1,026
560,50	1478,00	34,01	34,30	0,84	32,93	11,09	1,504
587,70	1487,00	34,54	28,25	0,74	33,66	10,41	1,238
585,50	1558,00	36,46	31,88	0,60	35,61	9,373	1,305
570,30	1485,00	35,70	33,50	0,56	34,64	9,055	1,391
523,70	1407,00	35,06	22,77	0,65	34,64	9,755	0,6335
487,70	1378,00	34,01	28,51	0,00	39,07	0,1	0,4819
P. hispanica							
Rabs (W/m ²)	pa (Pa)	ta (°C)	t _{mr}	V (m/s)	t _{cl}	hc	PMV
506,50	1356,00	25,85	27,02	0,14	20,62	4,527	1,628
505,80	1440,00	28,02	38,00	0,56	25,6	9,055	1,941
516,20	1354,00	30,41	30,68	0,51	28,68	8,641	1,383
513,00	1427,00	29,80	33,99	0,70	28,12	10,12	1,59
544,30	1405,00	30,92	36,25	0,70	29,2	10,12	1,775
522,80	1382,00	31,73	39,63	0,65	29,94	9,755	1,839
552,60	1362,00	32,76	48,02	0,56	30,37	9,055	2,447
517,60	1405,00	33,70	37,59	0,46	32,04	8,207	1,572
556,00	1440,00	34,33	48,03	0,51	32,08	8,641	2,36
535,10	1434,00	34,01	58,16	0,56	31,21	9,055	3,009
499,00	1367,00	34,01	34,97	0,19	31,64	5,274	1,373
490,10	1331,00	33,07	32,87	0,33	31,39	6,951	1,232

Tabla 8: Resultados obtenidos de la aplicación del modelo Fanger (PMV) a los casos de estudio seleccionados, considerando $W =$ radiación total absorbida (considera solar y terrestre).

En cambio, si en la ecuación 2, el valor de la carga térmica L es reemplazado por el valor resultante del balance energético del modelo COMFA, la curva de PMV se asemeja a la de S . Esta sería una buena aproximación ya que el COMFA tiene en cuenta un gran número de variables climáticas, microclimáticas, forestales y humanas, y los rangos en los que las mismas varían en los espacios abiertos (ver figura 4).

CONCLUSIONES

Tanto el modelo COMFA como el índice PMV son métodos deductivos para la evaluación del confort térmico de las personas y están basados en el balance energético de cuerpo humano. Además, ambos admiten el desglose de sus términos, lo cual permite evaluar con mayor precisión la incidencia de las interrelaciones entre las variables sobre los intercambios del cuerpo humano para poder intervenir sobre las estrategias de diseño urbano, con el objeto de maximizar el grado de habitabilidad de los espacios. De modo particular, el modelo COMFA y su balance de energía S proporcionan una minuciosa descripción del grado de confort en cada caso de estudio a lo largo del período evaluado. Vale recordar que este índice toma en cuenta un gran número de variables microclimáticas, forestales y humanas, por lo que el nivel de detalle del mismo

posibilita una gran diferenciación de las características tanto climáticas y microclimáticas como urbanas y forestales. Los resultados de este modelo indican que el canal más confortable es el que presenta menor SVF- el forestado con plátano-.

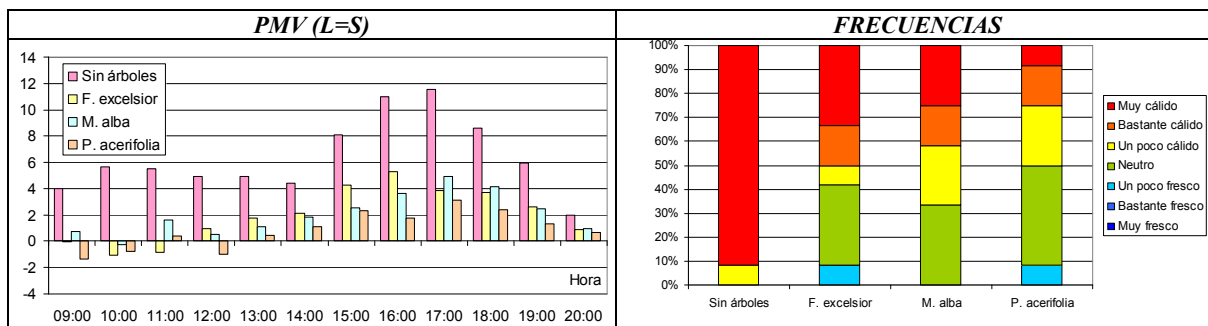


Figura 4: Valores de PMV y frecuencia de cada rango de confort, considerando el valor de L en la ecuación 2 igual a S del índice COMFA.

En cuanto al índice PMV, el mismo ha sido desarrollado en primera instancia para ambientes interiores donde las condiciones térmicas, radiativas y convectivas tienden a permanecer relativamente estables y controladas, por lo tanto no tiene en cuenta o tiende a subestimar los valores de la radiación solar y del coeficiente convectivo. Dada la importancia y trascendencia del PMV en numerosos estudios y normativas y de su sencilla escala de rangos de sensación es conveniente buscar la manera de adaptarlo a los espacios abiertos vegetados de zonas áridas.

Para solucionar los problemas derivados de los algoritmos utilizados para calcular cada uno de los términos del balance energético que el PMV plantea (discutidos anteriormente), se propone tomar el valor de la carga térmica L como el resultado del balance de energía S adoptado por el modelo COMFA ya que al ser concebido como un método para la evaluación del confort en espacios abiertos considera coeficientes adecuados y un mayor desglose de las variables intervinientes en los intercambios radiativos. Los resultados de la aplicación de esta alternativa claramente coinciden con los resultados del modelo COMFA, aún con diferencias en la escala de confort. Por lo que esta solución se presenta como una buena estrategia para homologar los resultados locales a los obtenidos internacionalmente, dado que el PMV es un índice de amplia difusión debido a la sencillez y adimensionalidad de su escala de confort.

REFERENCIAS

- ASHRAE (2004). ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- Brown, RD, Gillespie, TJ. (1995). Microclimate landscape design. New York: Wiley.
- Cantón, A., Cortegoso J, De Rosa, C. (1993). Solar permeability of urban trees in cities of western Argentina. Energy and Buildings 20, 219-230
- Correa, E. N.; Pattini, A.; Córca, M. L.; Fornés, M.; Lesino, G. (2005). Evaluación del Factor de Visión de Cielo a partir del Procesamiento Digital de Imágenes Hemisféricas. Influencia de la Configuración del Cañón Urbano en la Disponibilidad del Recurso Solar. Avances en Energías Renovables y Medioambiente 11, 43-48. Vol. 9 N°1. Comisión de Publicaciones de ASADES. INENCO, Salta.
- Correa E. N.; Ruiz M. Angélica; Cantón M. A. y Lesino G. (2009). Confort térmico y temperatura del aire en los espacios urbanos. Cómo se relacionan estos indicadores con las decisiones de diseño en ciudades de zonas áridas. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184; pp 01.121-01.128.
- Fanger P. O. (1972). Thermal comfort. New York: McGraw Hill.
- Gaitani N., Mihalakakou G., Santamouris M. (2007). On the use of bioclimatic architecture principles in order to improve thermal comfort conditions in outdoor spaces. Building and Environment 42, 317-324.
- ISO (2005). ISO Standard 7730: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. International Standards Organization, Geneva
- Monteiro, L; Alucci, M. P. (2006) Outdoor thermal comfort: comparison of results of empirical field research and predictive models simulation. Comfort and energy use in buildings. Windsor: Nceub.
- Oke, T.R (2004) Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations At Urban Sites. Iom Report, Td In Press, World Meteorological Organization, Geneva.
- Ruiz A.; Correa E. (2009). Confort térmico en espacios abiertos. Comparación de modelos y su aplicabilidad en ciudades de zonas áridas. Revista AVERMA. Avances en Energías Renovables y Medioambiente. pp 01.71-78. Vol. 13. ISSN 0329-5184. Comisión de Publicaciones de ASADES. INENCO, Salta.

ABSTRACT: This paper presents a comparative study of two deductive models of thermal comfort, identifying which of them can be properly used to estimate the thermal comfort in vegetated open spaces of cities in arid zones. Specifically compares the degree of thermal comfort achieved in four typical road channel, calculated from the model COMFA and PMV. The results show that the major discrepancies between the two are associated with the algorithms used by each of the methods for the estimation of the terms involved in the energy balance. In this sense the COMFA method being initially conceived for open space allows for a more detailed representation of the radiative and convective exchanges. We therefore propose to take the value of the heat load L in the PMV index equal to S from COMFA model for homologate both method.

Keywords: thermal comfort, outdoor spaces, COMFA, PMV.