



ASADES

Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente
Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184

CONFORT TÉRMICO EN ESPACIOS ABIERTOS. COMPARACIÓN DE MODELOS Y SU APLICABILIDAD EN CIUDADES DE ZONAS ÁRIDAS.

M. Angélica Ruiz ^{*1}, E. N. Correa^{*2}

* Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda - Instituto Ciencias Humanas Sociales y Ambientales (LAHV-INCIHUSA)
CONICET-CCT Mendoza. Argentina.

Tel. 0261-4288797 - Fax 0261-4287370, e-mail: aruiz@mendoza-conicet.gob.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta un estudio comparativo de diferentes modelos 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”. El método adoptado es experimental inductivo (investigación en campo de las variables climáticas a microescala) y deductivo (simulación de modelos de predicción). De modo específico se compara el grado de confort térmico alcanzado en tres configuraciones de canales viales vegetados típicos, calculados a partir de cuatro modelos distintos. Los resultados muestran que la selección del método a utilizar está condicionada al objetivo buscado. Cuando se pretende obtener un diagnóstico del grado y frecuencia en la que un espacio se halla en condiciones de confort o disconfort, los métodos inductivos de menor complejidad y número de variables resultan adecuados. Cuando se quiere intervenir sobre las estrategias de diseño urbano, con el objeto de maximizar el grado de habitabilidad de los espacios, la única posibilidad es recurrir al empleo de los métodos deductivos.

Palabras clave: confort térmico, espacios abiertos, métodos, ciudad oasis, zonas áridas.

INTRODUCCIÓN

Se sabe que el consumo energético en el interior de las construcciones y el confort térmico son principalmente afectados por las condiciones microclimáticas predominantes (Gaitani et al., 2007). El diseño de los espacios urbanos modifica las variables atmosféricas que influyen en el balance energético del cuerpo; estas variables afectan el confort humano y el consumo de energía en áreas urbanas. (Oke, 2004; Correa et al., 2006)

El estudio del confort térmico ha sido abordado mayoritariamente para recintos cerrados como oficinas, escuelas y hogares. Sin embargo, muchas actividades de recreación y de interés comercial, como eventos culturales y turísticos, se desarrollan en espacios abiertos (Spagnolo y de Dear, 2003). El confort térmico de las personas en espacios abiertos es uno de los factores que más influye en la habitabilidad de los espacios, dado que la cantidad e intensidad de actividades que el individuo realiza es afectada por el nivel de disconfort experimentado cuando se expone a las condiciones climáticas de esos espacios abiertos (Givoni et al., 2002).

Para introducir el concepto de índice de confort térmico en espacios abiertos es necesario recalcar las diferencias entre espacios exteriores e interiores. Mientras en un espacio interior, las condiciones térmicas, radiativas y convectivas tienden a permanecer relativamente estables y controladas (ya sea mediante las características morfológicas y tecnológicas del edificio como por el uso de energía auxiliar); los espacios exteriores se caracterizan por presentar grandes variaciones diarias y estacionales de parámetros micro-climáticos mucho más difíciles de controlar (humedad y temperatura del aire, temperaturas superficiales, viento y radiación) las cuales afectan el balance de energía del cuerpo condicionando de este modo su confort térmico.

El concepto de confort admite diferentes definiciones; desde una perspectiva “psicológica” el confort térmico humano se puede definir como la condición mental en la cual existe satisfacción con el ambiente térmico, la persona no prefiere estar ni en un entorno más cálido ni en uno más fresco. Esta es una definición difícil de conceptualizar debido a su carácter subjetivo; sin embargo los aspectos psicológicos son de significativo impacto en los espacios exteriores (Höppe, 2002). Desde el aspecto fisiológico, la definición de confort se basa en la activación de los receptores térmicos en la piel y el hipotálamo, en este caso la condición de confort se asocia a la mínima proporción de señales nerviosas desde éstos receptores. Si tomamos en cuenta la definición energética, basada en el criterio del balance energético entre el cuerpo humano y el ambiente, el confort térmico se alcanza cuando los flujos de calor desde y hacia el individuo están balanceados (Gomez et al., 2004; Gaitani et al., 2007).

El confort térmico depende de distintos parámetros. De modo específico, cuatro parámetros físicos caracterizan el ambiente térmico y determinan las condiciones de confort (Givoni, 1976; Berger, 1993): 1) La temperatura del aire: afecta los intercambios de calor con y sin transferencia de masa (secos y húmedos), así como el coeficiente de transferencia de calor. 2) Velocidad del viento: afecta en gran medida las pérdidas por convección y evaporación. Cerca del cuerpo vestido, el movimiento del cuerpo puede incrementar la velocidad. Una velocidad mínima de 0,1 m/s, existe siempre, debido a un movimiento permanente de aire natural en todas partes. 3) Humedad relativa: presenta un pequeño impacto cuando no hay

¹ Becaria Doctoral ANPCYT

² Investigadora CONICET

sudor, entonces, el intercambio de calor latente respiratorio y la transpiración de la piel son las dos únicas transferencias asociadas a la humedad. De lo contrario, la humedad del aire, afecta fuertemente la evaporación del sudor, y por lo tanto, la humedad de la piel. 4) La temperatura media radiante: que es la temperatura superficial uniforme de un recinto negro con el cual un individuo intercambia el mismo calor por radiación, que el que intercambia con el entorno real evaluado. Para los espacios exteriores, la temperatura media radiante representa la temperatura superficial uniforme de un recinto ficticio, en el que todas las superficies del recinto se encuentran en la misma temperatura (Matzarakis y Mayer, 2000).

Por otra parte, existen parámetros externos a tener en cuenta para el cálculo de las condiciones de confort térmico: 1) El nivel de actividad: el cuerpo convierte una parte de los alimentos en energía según el tipo de actividad. La cantidad de energía producida por unidad de tiempo se llama tasa metabólica y se expresa en vatios por m² de superficie corporal. 2) Ropa: Es una interfaz entre el cuerpo y el medio ambiente. Puede admitir o resistir los intercambios higrótérmicos. Las principales diferencias entre los cálculos de confort térmico en interiores y exteriores son: la ropa, el nivel de actividad y el periodo de exposición, el cual es comúnmente más corto en espacios abiertos que en recintos (Gaitani et al., 2007).

Este trabajo presenta un estudio comparativo de diferentes modelos 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”.

Los objetos de investigación son los modelos de predicción empírica y racional de confort térmico en espacios abiertos. El objetivo es verificar su aplicación en estudios de caso en la ciudad de Mendoza, Argentina. El método adoptado es experimental inductivo (investigación en campo de las variables climáticas a microescala) y deductivo (simulación de modelos de predicción). La investigación de campo consiste en tres escenarios diferentes.

OBJETIVO

El foco de esta investigación está puesto en los modelos predictivos de confort térmico. Se desea verificar su aplicabilidad en ciudades “oasis”- vegetadas - de zonas áridas, mediante el cálculo de confort en base a datos empíricos introducidos en distintos modelos predictivos. De modo específico se compara el grado de confort térmico alcanzado en tres configuraciones de canales viales vegetados típicos, calculados a partir de cuatro modelos distintos.

METODOLOGÍA

Selección de los casos de estudio

El espacio urbano de la ciudad de Mendoza se estructura en tres densidades edilicias características (Alta - Media y Baja), predominando la baja densidad edilicia en un 80 %. Destacan tres tipos de Cañones Viales Urbanos (CVU) tomando como variable de enfoque las dimensiones del ancho de las calles. Es así que se detectan canales viales de 16 m que constituyen un 25 % del total de la trama, canales de 20 m, que representan el 70 % y de 30 m en un 5 %. Respecto a su configuración forestal, el 83.78 % de las especies forestales corresponden a la Primera y Segunda Magnitud representadas mayoritariamente por *Platanus acerifolia* 21.52 %, *Morus alba* 38.27 % y *Fraxinus excelsior* 19.36 % (Cantón et al., 2003).

Si consideramos el aspecto energético, la elección de la magnitud del árbol ha de ser utilizada en los canales viales debe estar vinculada al perfil forestal buscado, dando respuesta a las necesidades termo-lumínicas del espacio. Las configuraciones pueden ser: túnel continuo sobre calzada y vereda, túnel interrumpido a nivel de calzada y pantalla homogénea sobre vereda, o bien el desarrollo individual del forestal sin superposición de copas.

El túnel continuo ofrece la ventaja de la sombra y la disminución de la ganancia solar sobre las envolventes horizontales y verticales, pero minimiza las posibilidades de enfriamiento radiativo y convectivo. El túnel interrumpido a nivel de calzada, aumenta la ganancia solar pero conserva la sombra sobre los espacios peatonales del cañón urbano, y mejora las condiciones para el enfriamiento nocturno. El desarrollo individual del forestal ofrece las mejores condiciones para el enfriamiento y las más desfavorables para la ganancia térmica. En este sentido es necesario un cuidadoso estudio del comportamiento térmico de estas configuraciones con las características de cada ciudad en particular (Correa et al., 2007). En la ciudad analizada, la primera configuración está representada por los canales viales forestados con plátanos (*Platanus acerifolia*); la segunda opción está representada mayoritariamente por aquellos forestados con moreras (*Morus alba*) y la tercera por canales forestados con fresnos (*Fraxinus excelsior*).

Basados en las características urbanas de la ciudad y en los criterios descriptos precedentemente, se decidió evaluar el comportamiento térmico de verano, de tres cañones urbanos de 20 m de ancho y baja densidad edilicia (ancho de trama y densidad edilicia predominante en la ciudad), forestados con fresnos, moreras y plátanos, que presentan perfiles forestales con distintas respuestas a las necesidades termo-lumínicas de los espacios y al mismo tiempo son representativos de las configuraciones urbanas típicas de la ciudad.

Monitoreo y evaluación del comportamiento térmico de los casos de estudio

Con el propósito de recopilar las variables necesarias para el cálculo del confort con cada modelo seleccionado, se instalaron tres estaciones fijas. Las estaciones son del tipo H08-003-02, los sensores se han colocado a una altura de 1,6 m desde el nivel de la calle (Oke, 2004), dentro de cajas perforadas de PVC blanco, con el objeto de evitar la irradiación de los mismos y asegurar una adecuada circulación de aire. Se programó las mediciones de temperatura (°C), humedad relativa (%) y humedad absoluta (g/m³) cada 15 minutos. Los datos fueron registrados durante el mes de febrero de 2009, y han sido evaluados estadísticamente para el periodo considerado de calentamiento que va desde la 8.00 AM a las 8.00 PM y para el enfriamiento comprendido entre las 9.00 PM y las 7.00 AM. 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. La dirección y velocidad del viento ha sido corregida para cada canal vial evaluado para una altura de 1,5 m, de

acuerdo a la ecuación logarítmica del perfil de viento (Brown y Gillespie, 1995). El factor de visión del cielo (SVF) 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 (Figura 1).

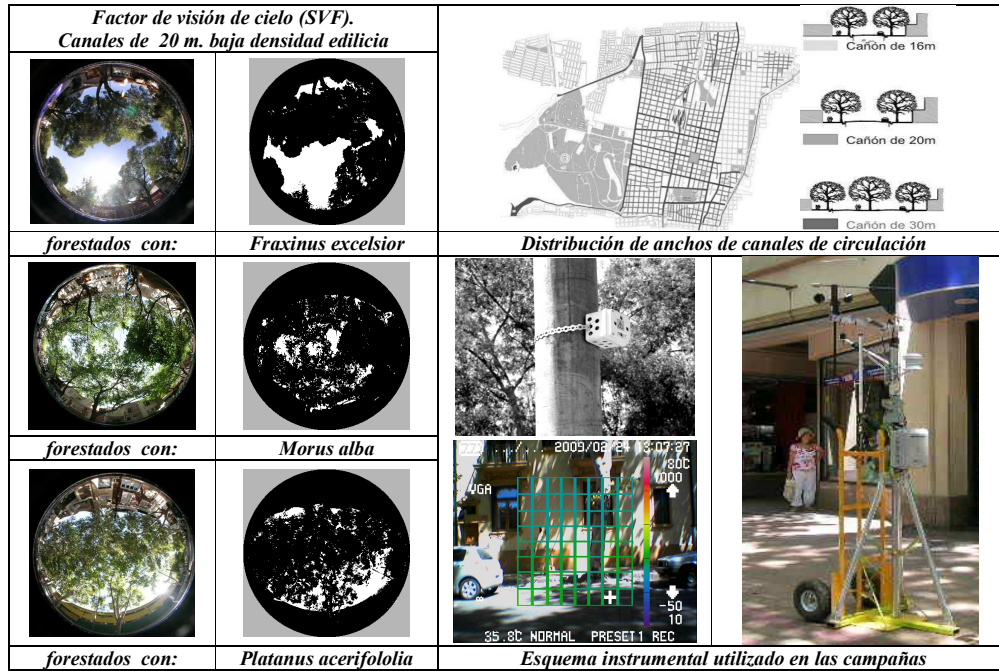


Figura 1. Distribución de canales viales según su ancho en el área de estudio. Mediciones de campo y procesamiento del factor de visión de cielo (SVF).

Índices de confort

Los índices de confort analizan variables climáticas y permiten cuantificar los rangos de confort para diferentes espacios o situaciones (Gomez et al., 2004). Los primeros índices bioclimáticos que surgieron (Índice de Disconfort, Windchill, Índice de Temperatura-Humedad) consideran sólo algunos parámetros meteorológicos (Thom, 1959; Clarke, 1971; Unger, 1999). Los modelos más recientes, basados en la ecuación del balance humano de energía, incorporan gran cantidad de variables no solo de índole climática, sino aquellas relacionadas con las características del individuo y del entorno.

En este trabajo, se han seleccionado cuatro modelos de confort térmico con sus respectivos índices, los cuales han sido ampliamente utilizados en diversos estudios. Los mismos son: el índice de disconfort (DI) (Thom, 1959); el índice de Vinje (PE) (Balaras et al., 1993; Gomez et al., 2004); el índice de sensación térmica (TS) (Givoni et al., 2002; Givoni y Noguchi, 2000); y el método COMFA (Brown y Gillespie, 1995; Scudo, 2002; Gaitani et al., 2007). A continuación, se explican las variables consideradas en cada uno de ellos.

En primer lugar, el índice de disconfort (DI), también conocido como índice de temperatura-humedad (THI), propuesto por Thom (1959) requiere de la temperatura del aire (T_a) medida en grados Celsius y la humedad relativa (RH), en porcentaje, tal como lo muestra la ecuación 1.

$$THI = 0,8.T_s + \frac{RH.T_a}{500} \quad (1)$$

Según la fórmula, el nivel óptimo de confort se obtiene para valores de THI que oscilan entre 15 y 20 °C (Tabla 1).

Categorías THI	
Muy frío	DI < -1.7
Frío	-1.7 ≤ DI ≤ +12.9
Templado	+13 ≤ DI ≤ +14.9
Agradable o confortable	+15 ≤ DI ≤ +19.9
Caluroso	+20 ≤ DI ≤ +26.4
Muy Caluroso	+26.5 ≤ DI ≤ +29.9
Tórrido	DI ≥ +30

Tabla 1: Categorías para la clasificación del grado de confort mediante el uso del índice de disconfort (DI o THI)

Mediante el testeo empírico de los valores de THI sobre seres humanos, los límites de confort para la estación estival se han definido de la siguiente manera (Nieuwolt, 1977):

- 21 ≤ THI ≤ 24 = el 100% de las personas se sienten confortables
- 24 < THI ≤ 26 = el 50% de las personas se sienten confortables
- THI > 26 = el 100% de las personas se encuentran en disconfort por calor.

El THI proporciona una medida de fácil evaluación que permite describir el grado de confort térmico en varias combinaciones de temperatura y humedad (Mather, 1974). Cabe mencionar que los rangos citados anteriormente fueron desarrollados en ciudades de latitudes medias en donde se localiza la ciudad analizada. Estas razones hacen del THI el índice de mayor difusión particularmente para establecer las condiciones de confort en espacios abiertos (Emmanuel R., 2005).

En segundo lugar, el índice de Vinje o PE (Balaras et al., 1993) incorpora al análisis la variable de la velocidad del viento (v) en m/s, mediante la ecuación 2.

$$PE = 0,57 \cdot v^{0,42} \cdot (36,5 - Ta) \cdot 36 \quad (2)$$

La Tabla 2 muestra los rangos de confort para el PE (Gomez et al. 2004).

Rangos VINJE (PE)	
Frío	>11
Confortable	5-11
Caluroso	<5

Tabla 2: Rangos de los valores de confort para el índice de Vinje y la Temperatura de globo de bulbo húmedo.

Por otro lado, la sensación térmica o TS (Givoni et al., 2002; Givoni y Noguchi, 2000) se define como la percepción de frío o calor, en una escala que va de 1 (muy frío) a 7 (muy caluroso). El nivel 4 corresponde a la sensación de confort, lo cual equivale a decir que el cuerpo no siente disconfort térmico. Este índice precisa de la medición de los siguientes parámetros climáticos: temperatura del aire (Ta , en °C); radiación solar horizontal (SR , en W/m²); velocidad del viento (WS , en m/s); humedad relativa (RH , en %); y temperatura superficial del suelo de los alrededores (ST , en °C) (Gaitani et al., 2007). Estos parámetros son incluidos en la siguiente fórmula de regresión múltiple, con un R^2 de 0,8792:

$$TS = 1,7 + 0,1118 \cdot Ta + 0,0019 \cdot SR - 0,322 \cdot WS - 0,0073 \cdot RH + 0,0054 \cdot ST \quad (3)$$

En la Tabla 3 se pueden ver los 7 niveles de la escala del modelo TS.

Nivel de Sensación	
TS =1	Muy frío
TS =2	Bastante frío
TS =3	Frío
TS =4	Confortable
TS =5	Caluroso
TS =6	Bastante caluroso
TS =7	Muy caluroso

Tabla 3: Escala de sensación térmica del método ST.

En éste método, el efecto refrigerante de valores de humedad relativa altos puede ser un error debido al pequeño número de sujetos con el cual se trabajó y puede no representar el efecto real de la humedad. Por otro lado, esto puede deberse a la particular combinación entre radiación solar y humedad en Japón, donde se llevó a cabo dicha investigación. La humedad es más baja y la temperatura más alta y los sujetos sienten más calor principalmente por la radiación solar. (Gaitani et al., 2007).

El método COMFA (Brown y Gillespie, 1995) consiste en seguir la fórmula básica que expresa el balance de energía de una persona en un ambiente abierto (Scudo, 2002; Gaitani et al, 2007):

$$S = M + R_{abs} - Conv - Evap - TR_{emitida} \quad (4)$$

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 4 muestra la sensación de confort humano relacionado con los valores del balance energético.

Balance (W/m²)	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 4: La sensación de confort humano relacionado con los valores del balance S .

Los parámetros que han sido considerados para correr el programa de cálculo en cada caso son detallados en la tabla 5.

Para una mejor descripción de cada modelo y siguiendo el criterio propuesto por Monteiro y Alucci (2004), se ha elaborado la Tabla 6 y la Tabla 7. La primera presenta las variables que incluye cada modelo y referencia bibliográfica donde se encuentran descriptos en detalle, la segunda propone una clasificación según el objeto de predicción del modelo, el principal método que utiliza y el principal criterio de interpretación de cada índice.

Variables	<i>Fraxinus excelsior</i>	<i>Morus alba</i>	<i>Platanus acerifolia</i>
Permeabilidad de cada especie en verano (%)	16.2	31.4	9.8
Albedo de construcciones	0.5	0.55	0.4
Albedo del suelo	0.1	0.1	0.1
Rugosidad del sitio	0.77	0.85	0.78
Aislamiento de la ropa (s/m) - periodo de calentamiento -	75 (remera, pantalones largos, medias y zapatos)		
Aislamiento de la ropa (s/m) - periodo de enfriamiento -	125 (remera, pantalones largos, medias, zapatos y rompevientos)		
Permeabilidad de la ropa - periodo de calentamiento -	150 (remera, pantalones largos, medias y zapatos)		
Permeabilidad de la ropa - periodo de enfriamiento -	65 (remera, pantalones largos, medias, zapatos y rompevientos)		

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

MODELOS		THI (DI)	PE	TS	S (COMFA)
VARIABLES	climáticas	Radiación global		X	X
		Radiación difusa			X
		Altitud solar			X
		Velocidad de viento		X	X
	micro-climáticas (urbanas)	Temperatura del aire	X	X	X
		Humedad Relativa	X		X
		Temperatura superficial			X
		Temperatura de suelo			X
		SVF			X
		Albedo edificio			X
		Albedo del suelo			X
	humanas	Tasa Metabólica			X
		Aislamiento de la ropa			X
		Permeabilidad ropa			X
		Temperatura de la piel			X
		Emisividad piel			X
		Albedo de la piel			X
	forestales	Albedo de la ropa			X
		Permeabilidad			X
		Rugosidad			X
REFERENCIAS		Thom EC, 1959, Emmanuel, 2005	Givoni et al., 2002; Givoni y Noguchi, 2000	Balaras et al., 1993; Gomez et al., 2004	Brown y Gillespie, 1995; Scudo, 2002; Gaetani et al., 2007

Tabla 6: Variables involucradas en los modelos considerados en este estudio.

MODELO	THI	PE	TS	COMFA
Objeto de la predicción: Estrés (E)/Confort (C)	C	E	C	C
Principal método que utiliza: Inductivo (I)/Deductivo (D)	I	I	I	D
Principal criterio de interpretación del índice: Por analogía (A) /Por parámetro fisiológico (Pf)/Por parámetro cualitativo (Pc)	A	A	Pc	Pf

Tabla 7: Propuesta de clasificación para los modelos estudiados.

RESULTADOS

Se procesaron las variables correspondientes a los casos evaluados (climáticas, urbanas, humanas y forestales), para cada uno de los modelos predictivos seleccionados. Se han obtenido los resultados tanto para el periodo de calentamiento como de enfriamiento, pero por razones de extensión del presente trabajo, sólo se ha consignado en la Figura 2 las gráficas de confort durante el periodo de calentamiento ya que es el que corresponde a la situación de habitabilidad más rigurosa (tanto en intensidad como respecto de la severidad climática).

El análisis comparativo para el periodo de calentamiento, muestra la variación del grado de confort de los casos analizados según el modelo utilizado. El modelo de temperatura-humedad (THI) expresa variaciones entre las distintas configuraciones urbanas forestadas, siendo el canal vial forestado con plátano, el que presenta mejores condiciones de confort (ver Figura 2a). Estas diferencias se pueden asociar a los esquemas termo-luminicos determinados por cada especie forestal.

A diferencia del THI, el modelo de Vinje o PE, muestra un perfil uniforme entre las distintas configuraciones urbanas, sobre todo en las horas de mayor radiación solar. Se perciben algunos picos, que pueden explicarse por aumentos intermitentes o aleatorios en la velocidad del viento (ver Figura 2c). Si consideramos que la radiación solar, en ciudades de zonas áridas, es uno de los parámetros climáticos determinantes del diseño de los espacios, podemos asumir que los resultados que este índice ofrece no representan una medida fiel de los intercambios energéticos que tienen lugar en los espacios de la ciudad. Como puede verse en la Tabla 2, la escala de valores de este índice puede prestarse a confusión, ya que el rango de disconfort por calor se evidencia con valores bajos del índice PE, a diferencia de la lógica adoptada por los otros índices en los cuales el mayor valor del indicador se corresponde con mayor grado de disconfort térmico.

Respecto del índice de sensación térmica o TS los resultados muestran que sus predicciones no reflejan, para el caso particular de esta ciudad; como la interacción entre la morfología urbana y la estructura vegetal influyen sobre las condiciones térmicas del espacio. Esto puede verse en la Figura 2e, en la cual el confort de los distintos espacios se muestra como un conjunto de tres curvas campanulares prácticamente iguales, donde el momento de mayor estrés térmico se sitúa entre las 12.00 PM y las 5.00 PM, coincidente con el periodo de máxima radiación solar.

Por último, el balance energético del COMFA aporta una minuciosa descripción del grado de confort en cada caso de estudio, tal como se observa en la Figura 2g. La misma presenta diferencias en el grado de confort alcanzado por las distintas configuraciones tanto a lo largo del periodo evaluado como entre estructuras vegetales. 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 mayor diferenciación de las características tanto urbanas como forestales, en adición a las climáticas consideradas por los demás índices. La tendencia que presentan los resultados derivados de este modelo coincide con la obtenida a partir del índice de confort o THI: el canal más confortable es el que presenta menor SVF, es decir, el forestado con plátano.

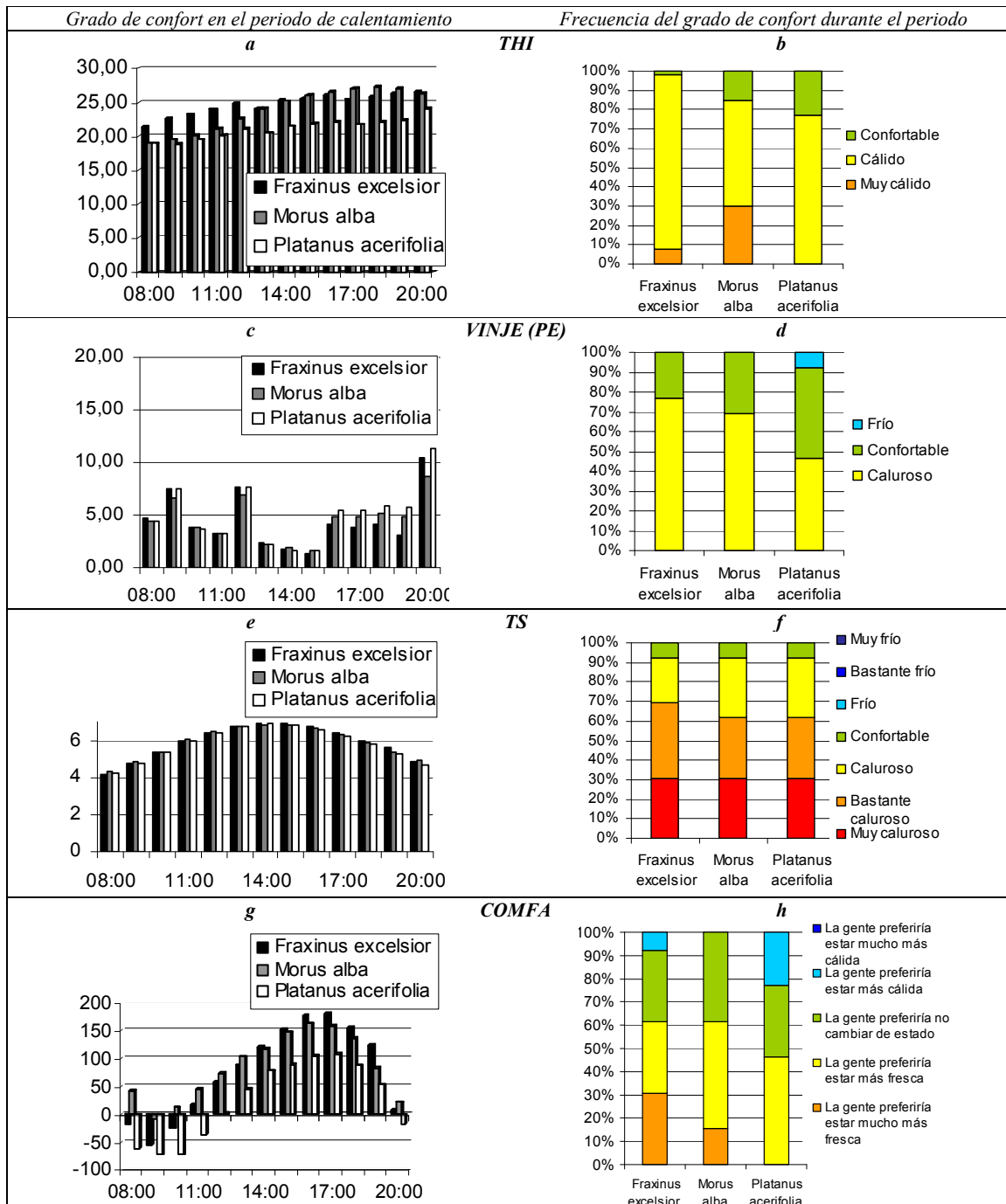


Figura 2: Resultados obtenidos de la aplicación de cada uno de los modelos a los casos de estudio seleccionados. Frecuencia de las condiciones de confort a lo largo del periodo evaluado según los rangos de cada modelo. Canales viales de 20 m de ancho, localizados en la trama de baja densidad edilicia, y forestados homogéneamente con fresnos, moreras y plátanos.

En el análisis para el periodo de enfriamiento, el THI, el TS y el COMFA arrojan resultados similares. Se observan menores fluctuaciones del grado de confort a lo largo de dicho periodo, así como también se minimizan las diferencias entre las configuraciones estudiadas. En el caso del COMFA, los menores valores del balance "S" son para el canal con mayor SVF (forestado con fresno), el cual permite mayores pérdidas de calor por enfriamiento radiativo. Durante la noche, la ciudad de

Mendoza presenta mayor frecuencia e intensidad de vientos que durante el día, por lo que el PE sí muestra diferencias y oscilaciones en este periodo.

Respecto de la distribución de frecuencias de las condiciones de confort a lo largo del periodo de calentamiento evaluado, se hace notar que existen grandes diferencias entre los rangos definidos por cada modelo. De acuerdo al comportamiento que muestran los espacios evaluados con los diferentes índices; el modelo que muestra menor porcentaje de tiempo en condiciones de confort durante el verano es el TS, con valores inferiores al 10 % para los tres casos. Le sigue el THI, entre 2 y 22 % del tiempo; luego el PE (desde 23 a 52%); y por último el COMFA, con valores entre 39 y 53 % de periodo.

El THI usado para la estación estival sólo evalúa el disconfort por calor en tres categorías. Los resultados obtenidos para los casos evaluados muestran gran parte del periodo de calentamiento en disconfort por calor, hasta el 98 % en el canal forestado con fresnos. La configuración con moreras muestra un 85 % del tiempo en disconfort, del cual el 30 % está dentro de la categoría “muy cálido”. La forestación con plátanos da un 78 % del tiempo en la categoría “cálido” (ver Figura 2b). En este caso, existe una diferenciación para las estructuras evaluadas, pero se aprecia una sobrestimación del grado de estrés térmico respecto de los demás índices. Un comportamiento similar se observa a partir de los resultados obtenidos a partir del TS, pero además, en este caso no se observan variaciones de confort asociadas a las estructuras urbanas y vegetales evaluadas.

El índice de Vinje o PE, exhibe mayor porcentaje del tiempo en confort, incluso en el caso del canal con plátanos, se observa cerca del 10 % del periodo dentro del rango “frio”, y sólo un 48 %, “caluroso”. Esto apoya la idea de que este índice es muy sensible a la variable velocidad del viento (ver Figura 2d).

El TS y el COMFA brindan mayor variabilidad en sus escalas de confort (ver Tabla 3 y Tabla 4), por lo tanto una mayor diferenciación dentro de las condiciones de disconfort. El índice de sensación térmica (TS) considera que los tres casos de estudio son prácticamente iguales y ofrecen menos del 10 % del periodo en el nivel “confortable” y aproximadamente el 30 % dentro del nivel “muy caluroso” (ver Figura 2f). Mientras que el COMFA muestra diferencias entre las configuraciones estudiadas: en los canales forestados con fresno o morera, la gente no preferiría cambiar de estado durante alrededor del 40 % del tiempo; pero en donde hay fresnos, hasta 30 % del tiempo, las personas se hallan en el nivel más riguroso de disconfort y preferirían estar mucho más frescas. En la configuración donde se incluye el plátano, la gente se encuentra el 55% del tiempo en condición de confort (ver Figura 2h).

En el estudio comparativo de la frecuencia del grado de confort durante el periodo de enfriamiento, no se perciben diferencias notorias entre las distintas configuraciones urbanas ni entre los modelos estudiados. En la figura 3, se observa el análisis de frecuencia del grado de confort a lo largo del periodo de calentamiento con rangos calibrados según los criterios adoptados por Nieuwolt (1977) y por Monteiro y Alucci (2006), en el cual se usa el método iterativo para maximizar la correlación entre los resultados y el testeo empírico sobre seres humanos. El COMFA es el modelo que muestra mayor diferenciación en la descripción del grado de confort, con 4 ó 5 categorías presentes de las siete posibles.

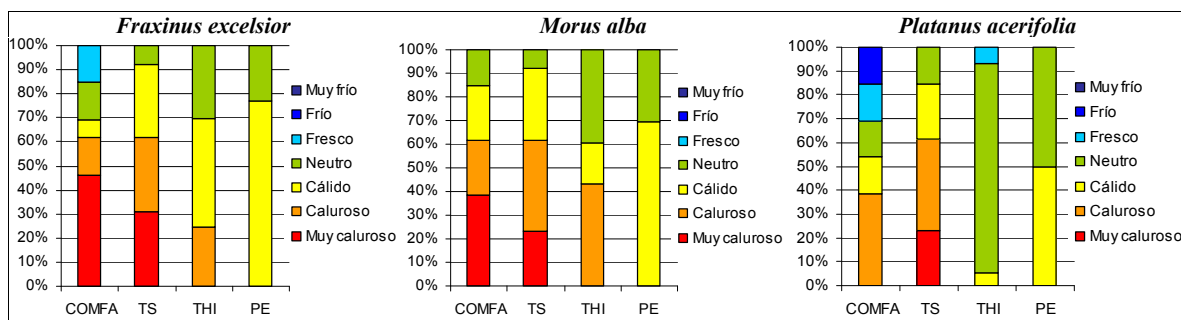


Figura 3: Frecuencia de las condiciones de confort a lo largo del periodo evaluado según los rangos calibrados.

A partir de la homogenización de los rangos; los resultados muestran que para las situaciones extremas, configuración forestada con plátanos (> bloqueo de la radiación solar) o con fresnos (< bloqueo de la radiación solar), los comportamientos de los espacios en términos de confort o disconfort pueden reflejarse debidamente mediante el uso de indicadores deductivos (COMFA) e inductivos (TS, THI, PE). Para el caso del plátano la tendencia que muestra el COMFA se puede asemejar con el índice PE y para el caso del fresno con el índice THI. Lo cual se explica mediante las variables que utiliza cada método. Por ejemplo, el PE no tiene en cuenta la radiación solar. Para el caso de las configuraciones forestadas con moreras, al presentar un comportamiento radiativo intermedio, ninguno de los índices de tipo inductivo refleja fielmente los resultados arrojados por el índice deductivo (COMFA), de mayor nivel de detalle y precisión en los intercambios considerados (ver Figura 3).

CONCLUSIONES

Es importante observar que todos los índices bioclimáticos tienen ciertas limitaciones debido a la naturaleza del ser humano y a los efectos combinados de las variables atmosféricas, las cuales varían ampliamente tanto en el espacio como en el tiempo.

En la práctica la selección del método a utilizar para determinar el grado de confort está condicionada al objetivo buscado. Cuando lo que se pretende es obtener un diagnóstico del grado y frecuencia en la que un espacio se halla en condiciones de confort o disconfort, los métodos inductivos de menor complejidad y número de variables involucradas resultan adecuados. En particular en ciudades de zonas áridas se propone el uso del THI para el diagnóstico del confort en canales viales que responden al perfil de desarrollo individual del forestal sin superposición de copas. Mientras que para el perfil forestal caracterizado por túnel continuo sobre calzada y vereda, el PE resulta ser el más apropiado. Para el caso de canales forestados con moreras, túnel interrumpido a nivel de calzada y pantalla homogénea sobre vereda, aunque de modo menos preciso el método inductivo que más se acerca al deductivo es el TS.

Cuando lo que se quiere es intervenir sobre las estrategias de diseño urbano, con el objeto de maximizar el grado de habitabilidad de los espacios, la única posibilidad es recurrir al empleo de los métodos deductivos, (COMFA en este trabajo), que permiten evaluar con mayor precisión la incidencia de las interrelaciones entre la variables climáticas, morfológicas y forestales sobre los intercambios del cuerpo humano. De este modo es posible detectar los factores (mecanismos de transferencia térmica) sobre los cuales las características de diseño de los espacios tiene mayor impacto y de este modo optimizar su funcionamiento.

De modo particular el grado de precisión de los métodos para determinar el confort térmico en ciudades de zonas áridas se encuentra influenciado principalmente por la cuantificación de la radiación solar que recibe un determinado espacio y los mecanismos radiativos asociados a este flujo energético, esto puede fundamentarse a partir de los resultados obtenidos para el periodo de enfriamiento, en el cual no existe radiación solar y para el que todos los métodos arrojan aproximadamente los mismos resultados.

REFERENCIAS

- Balaras, C., Tselepidaki, I., Santamouris, M.M.C., Asimakopoulos, D. (1993) Calculations and statistical analysis of the environment cooling power index for Athens, Greece. *Energy Conversion Management* 2:139–46.
- Berger, X. (1993) About thermal comfort. In: *Proceedings of the tirad PASCOOL meeting*. Florence, Italy: CMF Subgroup.
- 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
- Cantón, A., De Rosa, C. Y Kasperidus, H. (2003) Sustentabilidad del bosque urbano en el área metropolitana de la ciudad de Mendoza. Análisis y diagnóstico de la condición de las arboledas. *Revista AVERMA*. Vol. 7, N°1. pp 01.29-01.34
- Clarke, J.F., Bach, B. (1971) Comparison of the comfort conditions in different urban and suburban microenvironments. *International Journal of Biometeorology* 15:41–54.
- Correa, E. Et Al. (2007) Evaluación del impacto sobre la visión de cielo de las distintas densidades edilicias forestadas a partir de imágenes hemisféricas. Caso del Área Metropolitana de Mendoza. IX Brazilian Meeting on Comfort and Energy Efficiency in the Built-Up Environment. Brazil, Dec. 8-10.
- Correa, E. N. (2006) Tesis Doctoral. Isla de Calor Urbana. El Caso del Área Metropolitana de Mendoza. Universidad Nacional de Salta. Facultad de Ciencias Exactas.
- 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.
- Deosthali, V. (1999) Assessment of impact of urbanization on climate: an application of bio-climatic index. *Atmospheric Environment* 33(24–25):4125–33.
- Emmanuel, R. (2005) Thermal comfort implications of urbanization in a warm-humid city: the Colombo Metropolitan Region (CMR), Sri Lanka. *Building and Environment* 40 1591–1601.
- Fanger, P.O. (1972) *Thermal Comfort*. Doctoral Thesis.
- 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.
- Giles, B.D., Balafoutis, C.H. (1990) The greek heatwaves of 1987 and 1988. *International Journal of Climatology*;10:505–17.
- Givoni, B. (1976) *Man, climate and architecture*. 2nd ed. London: Applied Science Publishers.
- Givoni, B., Noguchi, M. (2000) Issues and problems in outdoor comfort research. *Proceedings of the plea 2000 conference*. Cambridge, UK.
- Givoni, B.; Noguchi M., Saaroni H., Pochter O., Yaacov Y., Feller N., Becker S. (2002) Outdoor comfort research issues. *Energy and Buildings*. 1462:11-10.
- Gomez, F.; Gil, L.; Jabaloyes, J. (2004) Experimental investigation on the thermal comfort in the city: relationship with the green areas, interaction with the urban microclimate. *Building and environment* 39, pp. 1077-1086.
- Höppe, P. (2002) Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings* 34, 661-665.
- ISO 7730 (1994) Second edition. Moderate thermal environments, Determination of the PMV and PPD. Indices and specification of the conditions for the thermal comfort, International Organization for Standardization.
- Mather, J.R. (1974) *Climatology: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill, USA.
- Matzarakis A, Mayer H. (2000) Estimation and calculation of the mean radiant temperature within urban structures. In: *Proceedings of the 11th seminar on environmental protection, environment and health*. Thessaloniki, Greece.
- Monteiro, L; Alucci, MP (2006) Calibration of outdoor thermal comfort models. *Conference on Passive and Low Energy Architecture*. 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.
- Nieuwolt, S. (1977) *Tropical climatology*. London: Wiley.
- Oke, T.R (2004) *Initial Guidance To Obtain Representative Meteorological Observations At Urban Sites*. Iom Report, Td In Press, World Meteorological Organization, Geneva.
- Spagnolo, J; de Dear, R (2003) A field study of thermal comfort and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia. *Building and environment* 38, 721-738.
- Thom, E.C. (1959) The discomfort index. *Weatherwise*; 12:57–60.
- Unger, J. (1999) Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a central-European city. *International Journal of Biometeorology* 1999;43:139–44.

ABSTRACT: This is a comparative analysis of the models of thermal comfort to identify which of them can best estimate and predict the thermal comfort of vegetated open spaces in arid cities that presents an urban oasis configuration. We have used both the experimental-inductive method (micro-scale field research of climatic variables) and four predictive-simulation models. By using the four predictive-simulation models, we compare the degree of thermal comfort achieved in three road-vegetated typical channels and conclude that the selection of the best method goes hand in hand with the goal of a given action, either research or urban planning. Indeed, the inductive methods -with their lower complexity and number of variables- are more appropriate for an accurate diagnosis of the degree and frequency in which a person feels comfort or discomfort in an open space. Nevertheless, deductive methods are the best option when the goal is the control of the urban design so as to maximize the degree of comfort achieved by a person in an open space.

Keywords: thermal comfort, open space, methods, urban oasis configuration, arid zones.