

APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS ADAPTATIVOS PARA LA EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO EN ESPACIOS ABIERTOS, EN MADRID

Artículo
Recibido 07-07-2015
Aceptado 11-15-2015

The application of adaptive thermal comfort indices for open space
assessment in Madrid

IRINA TUMINI, Universidad Politécnica de Madrid,
Madrid, España, irina.tumini@upm.es

ALEXIS PÉREZ FARGALLO, Universidad de Sevilla,
Sevilla, España, alexisfargallo@us.es

RESUMEN

El estudio de la percepción térmica en los espacios urbanos ha sido un tema de gran interés para numerosos científicos en el último tiempo. La calidad del ambiente externo tiene gran impacto en la sostenibilidad de las ciudades en cuanto que incide en el tráfico peatonal y en las actividades que allí se desarrollan, mejorando o empeorando la experiencia de los usuarios. Existe una extensa literatura sobre el confort térmico, sin embargo y a diferencia de lo que se verifica en los espacios interiores, en el exterior los sistemas de evaluación térmicos aplicados y basados en el estado estacionario tienden a sobrestimar la sensación de disconfort y, en consecuencia, son poco representativos de la percepción real del usuario. En este artículo se exploran las diferencias entre los modelos de adaptación fisiológica (UTCI) y psicológica (ASV) para la definición de la sensación térmica en los espacios exteriores, analizándose cuál de los sistemas se adapta mejor a las condiciones de Madrid y a su uso en la planificación urbana sostenible.

Palabras clave

confort térmico, urbanismo sostenible, espacios urbanos

ABSTRACT

In the last century, the issue of thermal perception in urban spaces has been of great interest for many researchers. The quality of the external environment greatly impacts the sustainability of cities because it influences pedestrian traffic and various outdoor activities, either improving or worsening the user experience. Despite extensive literature on thermal comfort and contrary to what has been verified in indoor spaces, outdoors, the application of thermal assessment systems based on the stationary state tend to overestimate the sensation of discomfort, and consequently do not truly represent user perception. This article explores the differences between the UTCI physiological adaptation model and the AVS psychological adaptation model for the definition of thermal sensation in outdoor spaces, in order to determine which is the most suitable for Madrid climate conditions and use in sustainable urban planning.

Keywords

thermal comfort, sustainable urban planning, urban spaces

EL CONCEPTO DE CONFORT TÉRMICO.

El conocimiento del clima urbano y de cómo afecta a las personas es un tema que ha sido investigado desde hace muchos siglos. Hoy en día el estudio del clima urbano se enfrenta a los retos que demanda la sociedad, cada vez más preocupada por el cambio climático y la sostenibilidad. Eso supone un cambio en las líneas de investigación prioritarias en este tema que se enfocan en entender la relación entre condiciones medioambientales y la percepción del hombre (Fernández García, Galán y Cañada Torrecilla, 2012), en la cual la sensación térmica asume un papel relevante.

Actualmente, existen numerosos índices que han sido desarrollados con el objetivo de relacionar las condiciones microclimáticas locales con la percepción térmica de los usuarios en los espacios públicos. La mayoría de ellos son los llamados modelos estacionarios que se basan en el equilibrio termodinámico entre el ambiente y el cuerpo humano (Figura 1). Entre ellos, hay que recordar el *Predicted Mean Vote* (PMV) (ISO 7730:2005), usado principalmente en los ambientes interiores, y entre aquellos adaptados a los espacios abiertos destaca el *Physiological Equivalent Temperature* (PET) (Höppe, 1999), el *Standard Effective Temperature* (SET) y otros desarrollados para el acondicionamiento climático, para las Olimpiadas de Sídney (Spagnolo y De Dear, 2003).

A nivel español, existe el rango de sudoración, un modelo fisiológico empleado para el diseño del sistema de acondicionamiento climático de la Expo '92 de Sevilla (Guerra Macho et al., 1995) que evalúa condiciones de confort en los espacios interiores y en las zonas de distribución exteriores entre los edificios expositivos. El índice señala la cantidad de sudor secretada por el cuerpo de una persona aclimatada y de constitución media para mantener el equilibrio térmico entre cuerpo y ambiente. El valor empleado para el proyecto de la Expo'92 se representa en la cantidad de sudor en gramos por hora, mediante una función lineal que coloca en las ordenadas la temperatura del aire (°C) y en las abscisas la humedad relativa (%), fijando como valor aceptable el rango de sudoración de 10g/h y como límite de confort 30g/h (Guerra Macho et al., 1995; Tornero, Pérez Cueva y Gómez Lopera, 2006; Fernández García, Galán y Cañada 2012).

Otros sistemas muy utilizados en fase de diseño, son los sistemas gráficos basados en los diagramas psicrométricos como el de Givoni (1998) y el climograma de Olgay (1969). Este último se sustenta en la definición de las condiciones de confort de una persona que desarrolla una actividad física ligera (paseando), vestida con ropa de entretiempo (1 clo), sin viento y a la sombra. Debido a que la adaptación del cuerpo humano tiene una limitación biológica, el nivel de temperatura de confort está fijado en 26,5°C para las zonas calientes y en 21,1°C para las localidades frías. El diagrama puede ser provechosamente

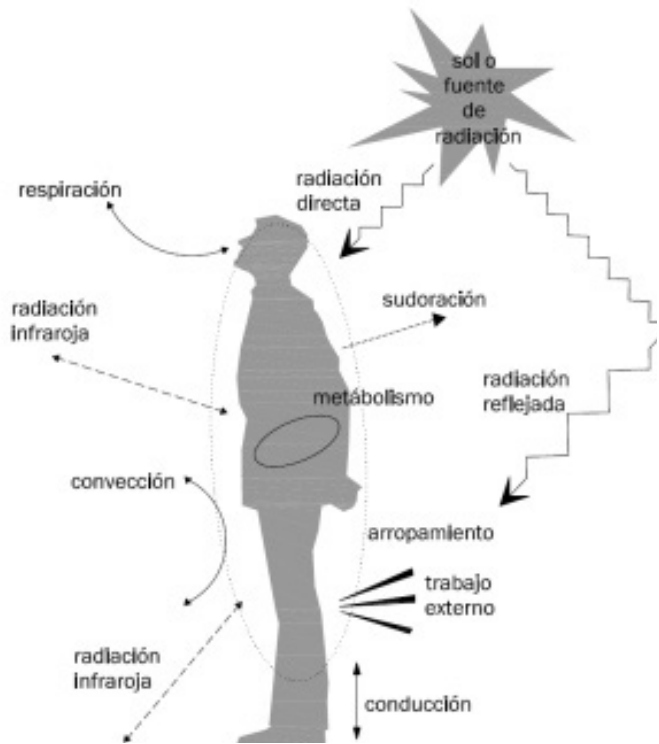


Figura 1. Intercambio de calor entre cuerpo humano y ambiente. Elaboración propia a partir de Jendritzky, de Dear y Havenith (2012).

empleado en el diseño bioclimático para la determinación de las condiciones de confort en cada momento del año y saber cuándo se necesita aportar calor, aportar frío o favorecer la ventilación. Sin embargo, este método ha recibido críticas respecto a los más modernos, por ofrecer estos un mayor grado de detalle en la evaluación del "nivel de comodidad" (González Neila, 2011).

A pesar de los indudables avances que se han producido en la generación de nuevos indicadores de confort térmico para espacios interiores, en los abiertos no se ha alcanzado un acuerdo sobre la definición de un índice único (Johansson, 2006). Eso se debe, en primer lugar, a algunas diferencias sustanciales en las condiciones de partida (Höppe, 2002; Jendritzky, de Dear y Havenith, 2012), como: el tiempo de exposición, normalmente inferior al de los espacios interiores, la actividad física desarrollada y el nivel de arropamiento. Estas variables pueden cambiar en función de la época del año, por ello los índices de confort de tipo estáticos pueden ser empleados en la evaluación de los espacios exteriores solo para exposiciones prolongadas (Höppe, 2002). Y, en segundo término, a que se ha empezado a considerar la influencia de los procesos psicológicos y culturales, a partir de estudios realizados en las playas italianas (Höppe, 1991) y australianas (Queensland) (De Freitas, 1985). Tales estudios demuestran que las personas se exponen voluntariamente a condiciones térmicas que pueden definirse extremas,

Tipo de adaptación	Descripción	Estado
Física	Todas las acciones operadas por el individuo de forma consciente para regular su condición de confort térmico: aumentar o reducir el arropamiento, cambiar de posición o cambiar el propio metabolismo.	Voluntario y reactivo.
Fisiológica	Se considera los mecanismos de aclimatación generados por el cuerpo y que se diferencian según las reacciones fisiológicas en: instantáneas, estacionales o genéticas.	No consciente o involuntario.
Psicológica	El espacio confortable se define como aquel en el que las personas se sienten en condición de bienestar térmico. Los factores que influyen en la sensación de bienestar dependen de la percepción del espacio y de los fenómenos que se producen en él.	Perceptivo o no consciente.

Tabla 1. Tipo de adaptación térmica de las personas a su entorno. Fuente: Elaboración propia a partir de Cena y Clark, 1981; Höppe, 1999; Nikolopoulou y Steemers, 2003; Nikolopoulou y Lycoudis, 2006.

subrayando la importancia de los factores psicológicos en las expectativas térmicas (Höppe, 2002) y contradiciendo a veces los índices basados en los parámetros fisiológicos y en el balance térmico (Nikolopoulou y Steemers, 2003; Jendritzky, De Dear y Havenich, 2012).

Nikolopoulou y Steemers (2003) sugieren que en la adaptación fisiológica y psicológica, la naturalidad, la experiencia, el tiempo de exposición y la percepción sobre el control, son factores muy importantes para la sensación de bienestar térmico. Y la experiencia lo es especialmente, ya que se vuelve fundamental para comprender que en la sensación de bienestar no influyen solo las componentes ambientales y de adaptación fisis-psicológica, sino también otros parámetros subjetivos (Nikolopoulou y Steemers, 2003).

Según la Real Academia Española, la "adaptación" para un ser vivo significa acomodarse a las condiciones de su entorno. Según Nikolopoulou (2003), es la respuesta gradual de un organismo sometido a una exposición repetida de un estímulo, involucrando todas las acciones aptas para mejorar la supervivencia en un ambiente. El hombre reacciona a las condiciones ambientales de forma involuntaria (fisiológica) o consciente (controlada) y, en algunos casos, eso depende de la percepción personal y subjetiva de la sensación de confort (Cena y Clark, 1981; González Neila, 2011). Así, para mantener su estado térmico, el hombre puede recurrir a la llamada adaptación fisiológica y a modificaciones de comportamiento que van desde desplazarse al sol o a la sombra, a usar sistemas de aislamiento como la vestimenta o climatizar el espacio.

En resumen, es posible distinguir dos enfoques de evaluación para los procesos de adaptación: uno basado en el balance térmico entre cuerpo y ambiente, esto es, en la respuesta fisiológica al estímulo causado por determinadas condiciones climáticas; y otro, que involucra a su vez factores psicológicos y de percepción del ambiente. En este trabajo se han evaluado dos índices representativos de los dos enfoques: el *Universal Thermal Comfort Index* - UTCI (adaptación fisiológica) y el *Actual Sensation Vote* - ASV (adaptación psicológica).

MODELO DE ADAPTACIÓN FISIOLÓGICA – UTCI.

El *Universal Thermal Comfort Index* - UTCI es un índice asociado al modelo de adaptación fisiológica resultado de los trabajos de investigación de la Action COST 730¹, que reunió a expertos procedentes de 23 países (Australia, Canadá, Israel, diferentes países de Europa, Nueva Zelanda y EE.UU.) bajo el paraguas de la Comisión de Climatología del WMO².

El nuevo sistema de evaluación de confort nació con el objetivo de crear un índice internacionalmente reconocido, aplicable a diferentes lugares y usos, entre los últimos: dar información meteorológica, alertas públicas, planeamiento preventivo o en las investigaciones relacionadas con el impacto climático en la salud (Jendritzky, de Dear y

[1] Programa Europeo para promover la Cooperación en Ciencia e Innovación Tecnológica.
 [2] World Meteorological Organization (Organización Mundial de Meteorología).

UTCI (°C) rangos	Categorías de Estrés
superior +46	Calor extremo
+38 a +46	Calor muy fuerte
+32 a +38	Calor fuerte
+26 a +32	Calor moderado
+9 a +26	Bienestar
+9 a 0	Frío ligero
0 a -13	Frío moderado
-13 a -27	Frío fuerte
-27 a -40	Frío muy fuerte
inferior -40	Frío extremo

Figura 2. Categorías de estrés térmico del índice UTCI. Fuente: Elaborado a partir de Commission for Thermal Physiology, 2003.

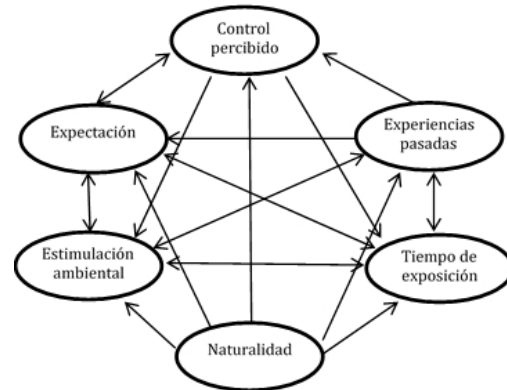


Figura 3. Esquema de influencia entre los diferentes parámetros de la adaptación psicológica. Elaboración propia a partir de Nikolopoulou y Steemers (2003).

Havenith, 2012). Por eso, el sistema debía asegurar una correcta representación del comportamiento del cuerpo humano de un sujeto no aclimatado en espacios exteriores, respecto a un amplio abanico de condiciones climáticas (calor, frío, viento fuerte, humedades muy altas o muy bajas, radiación solar muy fuerte, etc.).

El UTCI sigue el concepto de "temperatura equivalente" (ET) el cual involucra la noción de ambiente de referencia y sus siguientes características: humedad relativa del 50% (presión de vapor máxima de 20 hPa), aire calmo y temperatura media radiante igual a la temperatura del aire. La respuesta fisiológica de la persona fue calculada después de exposiciones de 30 y 120 minutos. El UTCI se expresa en °C equivalentes, asociados a una escala de valores donde se relaciona la temperatura UTCI con el estrés térmico. De acuerdo con este criterio, el estrés térmico se categorizó en una escala ligeramente asimétrica y cuya zona de confort se ubica entre los 9 y los 26°C (ver Figura 2) (Bröde et al., 2012).

El UTCI se desarrolló usando como parámetros de *input* los valores climáticos obtenidos de la información meteorológica convencional: temperatura del aire (T_a , °C), temperatura media radiante (T_{mrt} , °C), contenido de agua en el aire expresado en humedad relativa (H_r , %) o humedad absoluta (H_a , gr). Todos los datos fueron medidos a 2m sobre el nivel del suelo, excepto la velocidad del viento que fue calculada a 10m sobre el nivel del suelo (W , m/s). La estimación de estos parámetros no necesita recurrir a mediciones especiales, aunque las mayores incertidumbres en su cálculo se deben a la dificultad de obtener el valor de T_{mrt} .

MODELO DE ADAPTACIÓN PSICOLÓGICA – ASV.

El *Actual Sensation Vote* (ASV) es el resultado del proyecto de investigación RUROS³, cuyo objetivo consistió en definir un índice asociado a un modelo de confort capaz de representar el enfoque adaptativo, relacionando la sensación de bienestar térmico y los componentes físicos, fisiológicos y psicológicos. Para ello se realizó un trabajo de campo en siete ciudades europeas (Atenas, Salónica, Friburgo, Milán, Cambridge, Sheffield y Kassel) en el que se recopilaban y analizaron más de 10.000 datos. El proyecto nació del reconocimiento de la conexión entre el ambiente físico, los aspectos sociales y las condiciones ambientales en el uso del espacio público. Gracias al trabajo de investigación, se desarrolló una plataforma de análisis de espacios urbanos mediante la combinación del ambiente físico y de los requisitos de los usuarios, generando herramientas de diferente complejidad para la evaluación de la percepción de los espacios abiertos, fácilmente utilizables por los arquitectos y proyectistas (Nikolopoulou y Steemers, 2003; Nikolopoulou y Lykoudis, 2006; Nikolopoulou y Lykoudis, 2007; Tseliou et al., 2010)

El estudio de los datos recabados demostró que las condiciones térmicas ambientales influyen de forma determinante en la decisión de permanecer y usar un espacio al aire libre, aunque se desconoce la influencia de los factores psicológicos y perceptivos. En la Figura 3, se propone un diagrama de conexiones posibles entre los parámetros de adaptación psicológica; la conexión puede ser unidireccional o bidireccional en caso de que ambos parámetros se afecten entre sí.

[3] Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces (RUROS) es un proyecto de investigación, coordinado por el Centro de Energía Renovable (CRES-Centre for Renewable Energy Sources) para el análisis de los espacios urbanos, que combina en sus estudios el contexto físico con el grado de satisfacción de los usuarios.

Los antecedentes recopilados permitieron la formulación del índice de evaluación de la sensación térmica ASV, basado en una escala de 5 rangos que varía de “muy frío” a “mucho calor”. Su cálculo se realiza a partir de la temperatura del aire T_a (°C), la radiación solar global S (W/m²), la velocidad del viento W (m/s) y la humedad relativa H_r (%) (Nikolopoulou, 2004) El concepto de adaptación es intrínseco al modelo y se explicita en la siguiente ecuación lineal:

$$(1) ASV = 0.049 T_a + 0.001 S - 0.051 W - 0.014 H_r - 2.079 \quad (r=0.78)$$

El uso del modelo se limita al rango de temperatura, que va de 5 a 35°C, debido a la falta de mediciones en condiciones ambientales extremas.

OBJETIVOS

El confort térmico es un factor determinante en la calidad de los espacios exteriores de las ciudades, sin embargo, existen todavía muchas incertidumbres sobre cómo medir la sensación de dicho bienestar y de cómo afecta las decisiones del usuario. A partir de la revisión bibliográfica, que nos indica que los índices de confort de tipo adaptativos son los más adecuados para la evaluación de los espacios exteriores, se propone realizar una comparación entre el UTCI y ASV para observar su aplicabilidad en los climas templados secos. El objetivo de este trabajo consiste, por tanto, en analizar la aplicabilidad de los dos sistemas y su utilización en trabajos de diseño y adecuación bioclimática de los espacios urbanos existentes. La selección de los dos índices a estudiar responde a las condiciones que siguen:

- Se trata de índices novedosos en el panorama científico de las investigaciones relativas al confort en espacios urbanos y ambos se proponen superar las comprobadas limitaciones de otros modelos.
- Ambos pueden ser calculados a partir de datos climáticos obtenidos de mediciones *in situ* o de procesos de simulación.
- La evaluación de la sensación térmica se realiza a través de un valor numérico asociado a una escala cualitativa que permite la comparación objetiva de los diferentes casos de estudio.

METODOLOGÍA

Para alcanzar el objetivo se propone un trabajo de investigación aplicado a un caso de estudio en Madrid, basado en la evaluación comparativa de los dos índices y limitado a las condiciones climáticas más extremas, que corresponden a las de verano. El análisis comparativo se realiza usando como referencia el rango de sudoración, parámetro experimental empleado para la evaluación de las condiciones de confort en la Exposición Universal de Sevilla (España) en 1992, y el sistema gráfico del climograma de Olgay, adaptado para espacios exteriores. Ambos sistemas han sido utilizados para el diseño bioclimático de espacios urbanos (Guerra Macho *et al.*, 1995; Fariña Tojo *et al.*, 2013) y han demostrado ser adecuados en presencia de disconfort térmico por calor.

Aunque estos dos parámetros sean muy reconocidos, los sistemas gráficos resultan poco prácticos a la hora de realizar un análisis exhaustivo de datos puesto que si se comparan escenarios que arrojen resultados muy parecidos no se apreciará tal diferencia, sin embargo, si resultan útiles para realizar un análisis global facilitando el análisis entre una cantidad de datos importante. Por eso, el rango de sudoración y la carta de Olgay se han utilizado para la comparación entre el UTCI y ASV.

Las condiciones térmicas de los distintos escenarios de evaluación se calcularán a partir de los resultados obtenidos con la simulación en el software ENVI-met 3.1 (Bruse, 2004). Esta herramienta permite llevar a cabo una simulación numérica de las condiciones microclimáticas en el espacio urbano, a partir de la definición de un modelo 3D y de las condiciones térmicas del contexto. El sistema se apoya en el cálculo computarizado de fluido dinámica (CFD) para la evaluación de la interacción entre superficies-plantas-aire, a microescala en el espacio urbano (*ídem*).

El modelo se ha realizado definiendo un área de estudio de 231x135m, y un mallado tridimensional de 3x3x3m; las materialidades de los edificios se asignaron por defecto en la herramienta, y los elementos de vegetación se seleccionaron entre los más apropiados de su base de datos. En este trabajo, el intervalo de tiempo analizado se ha limitado entre las 9:00 y las 21:00 horas, ya que constituye el periodo de mayor ocupación del espacio público, y los resultados expuestos se refieren a una altura de 1,20m.



Figura 4. Área de estudio del barrio de Moratalaz. Foto aérea y fotos del boulevard y del parking.
 Fuente: Googlemaps y elaboración propia, respectivamente.

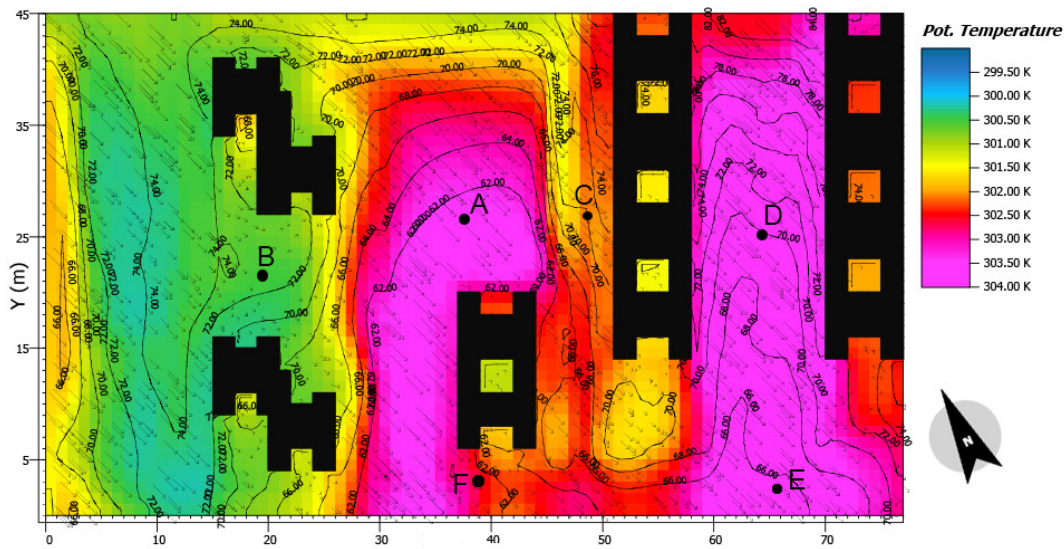


Figura 5. Resultados de la simulación en condiciones de verano a las 15:00 horas. En negro, se indica los edificios, la temperatura se expresa a través del mapa de colores, las isóneas señalan el valor de humedad relativa y las flechas, la intensidad y dirección del viento.
 Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

Los escenarios a evaluar se localizan en Madrid, ciudad que se encuentra al sur de Europa en la zona central de España (40° 26'N 3°41'O), y cuya altura sobre el nivel del mar es de 667m, por lo cual se trata de la capital más alta de Europa. Se caracteriza por un clima templado con veranos secos y calurosos, según la clasificación de Köppen 4, donde las temperaturas medias varían entre los 6°C en invierno y los 24°C en verano, alcanzando picos superiores a los 30°C

en los meses más calurosos (julio y agosto) (Departamento de Producción de la Agencia Estatal de Meteorología de España, Área de Climatología y Aplicaciones Operativas y Departamento de Meteorología e Clima, 2011).

Concretamente, se analizó el Barrio de Pavones en el distrito de Moratalaz, por su representatividad dentro de la tipología urbana de las periferias de la ciudad. El área de estudio está constituida por edificios aislados de 5 y 11 plantas con soportales a lo largo de todo el perímetro, su orientación principal es NE-SO y su acimut sur es de 27°. La organización del espacio libre entre los edificios

	<i>Ta</i>		<i>RH</i>		<i>W [m/s]</i>	<i>Sol Dir</i>	<i>Sol Dif</i>	<i>Sol Ref</i>	<i>Sol Glo</i>	<i>UTCI</i>	<i>ASV</i>
	[°C]	<i>Tmrt</i> [K]	<i>ATmrt</i>	[%]							
Hour 9:00											
a)	22,99	334,90	38,91	67	1,37	791	71,78	14,64	877,42	33,7	0,79
b)	21,83	292,43	-2,40	74,77	0,38	0	71,29	5,62	76,91	22,4	0,09
c)	21,94	294,86	-0,08	74	1	0	48,34	61,52	109,86	22,7	0,09
d)	22,14	323,08	27,94	76	1,09	0	66,9	24,41	91,31	30,9	0,11
e)	22,44	330,66	35,22	73	1,33	791	77,64	2,92	871,56	32,6	0,85
f)	22,51	298,26	2,75	69	0,69	791	72,27	13,67	876,94	24,2	0,83
Hour 12:00											
a)	28,98	339,88	37,9	57	1,49	970,82	105,05	17,97	1093,84	38,8	1,16
b)	26,37	289,89	-9,48	71	0,39	0,14	104	19,17	123,31	25,3	0,31
c)	26,79	300,4	0,61	66	0,95	0	70,75	75,5	146,25	28	0,26
d)	28,17	345,75	44,58	63	1,29	970,82	97,9	29,96	1098,68	40,1	1,22
e)	27,64	333,07	32,43	61	1,32	970,82	113,62	3,59	1088,03	36,5	1,15
f)	28,17	309,18	8,01	59	0,73	338,74	105,76	16,77	461,27	31,1	0,55
Hour 15:00											
a)	30,49	342,48	38,99	56,06	1,71	954,84	102,24	17,68	1074,76	40,5	1,19
b)	27,93	346,63	45,7	68	0,43	0,1	101	18,86	119,96	41	0,34
c)	28,97	335,36	33,39	62,23	1,02	672,37	68,85	74,26	815,48	38,5	0,98
d)	29,93	348,22	45,29	60,5	0,78	954,84	95,29	29,47	1079,6	40,4	1,27
e)	29,28	337,23	34,95	59,79	1,36	954,84	110,59	3,53	1068,96	38,7	1,19
f)	30,13	337,29	34,16	56	1,05	320,91	102,94	16,5	440,35	39,2	0,57
Hour 18:00											
a)	27,95	335,56	34,61	63,29	1,81	689	59,54	12,75	761,29	36,9	0,85
b)	26,95	340,08	40,13	68,94	1,27	688	58,73	14,45	761,18	38,1	0,90
c)	27,28	299,37	-0,91	66,73	1,03	2,88	40,1	53,58	96,56	28,1	0,24
d)	27,87	340,95	40,08	66,68	1,43	689	55,49	21,26	765,75	38,8	0,91
e)	27,88	332,97	32,09	64,8	1,4	689	64,4	2,55	755,95	36,7	0,88
f)	27,98	332,87	31,89	62,56	1,06	689	62,78	5,95	757,73	37	0,87
Hour 21:00											
a)	23,66	289,56	-7,1	71	1,78	0	0	0	0	21,6	-0,02
b)	22,87	287	-8,87	76	0,4	0	0	0	0	21,6	0,09
c)	23,2	289,63	-6,57	73	0,96	0	0	0	0	22,2	0,03
d)	23,23	289,97	-6,26	74	1,22	0	0	0	0	22,2	0,03
e)	23,37	286,79	-9,58	72	1,39	0	0	0	0	21	0,00
f)	23,66	287,27	-9,39	70	0,78	0	0	0	0	21,8	0,02

Tabla 2. Valores obtenidos de la simulación con ENVI-met y valoración del confort con el índice UTCI y ASV para las condiciones de verano. Elaboración propia.

se caracteriza por la presencia de avenidas y zonas arboladas, en el centro del área seleccionada se sitúa un gran aparcamiento con suelo de asfalto sin ningún tipo de protección solar.

Los puntos de observación identificados en el área son:

- a) Centro del área de aparcamiento.
- b) Área de juego de niños.
- c) Fachada oeste del edificio central longitudinal.
- d) Centro del cañón entre los dos edificios lineales de 5 plantas.
- e) Zona dedicada al tráfico vehicular.
- f) Área ajardinada.

En los puntos identificados en la Figura 4 se aplicarán los sistemas adaptativos UTCI y ASV, para evaluar y comparar los valores de confort térmicos obtenidos en condiciones de invierno y de verano.

RESULTADOS

A través de la simulación 3D con la herramienta ENVI-met se obtuvieron los parámetros climáticos necesarios para realizar el cálculo de los índices de confort en condiciones de invierno y de verano. El sistema permite estimar un amplio abanico de resultados que son visualizados, a través de la herramienta LEONARDO, de manera gráfica en secciones horizontales y verticales en los puntos del espacio definidos por el usuario (Figura 4). Aunque tanto las condiciones de verano como las de invierno presentan condiciones de disconfort, el estudio se limitó finalmente al análisis de las condiciones de verano porque resultan ser las más perjudiciales en cuanto a bienestar térmico del espacio exterior de Madrid (Tumini, 2013).

En relación a los resultados de la simulación, se puede observar, en la Tabla 2, que las estaciones a, d y f son las que muestran, en verano, temperaturas más altas

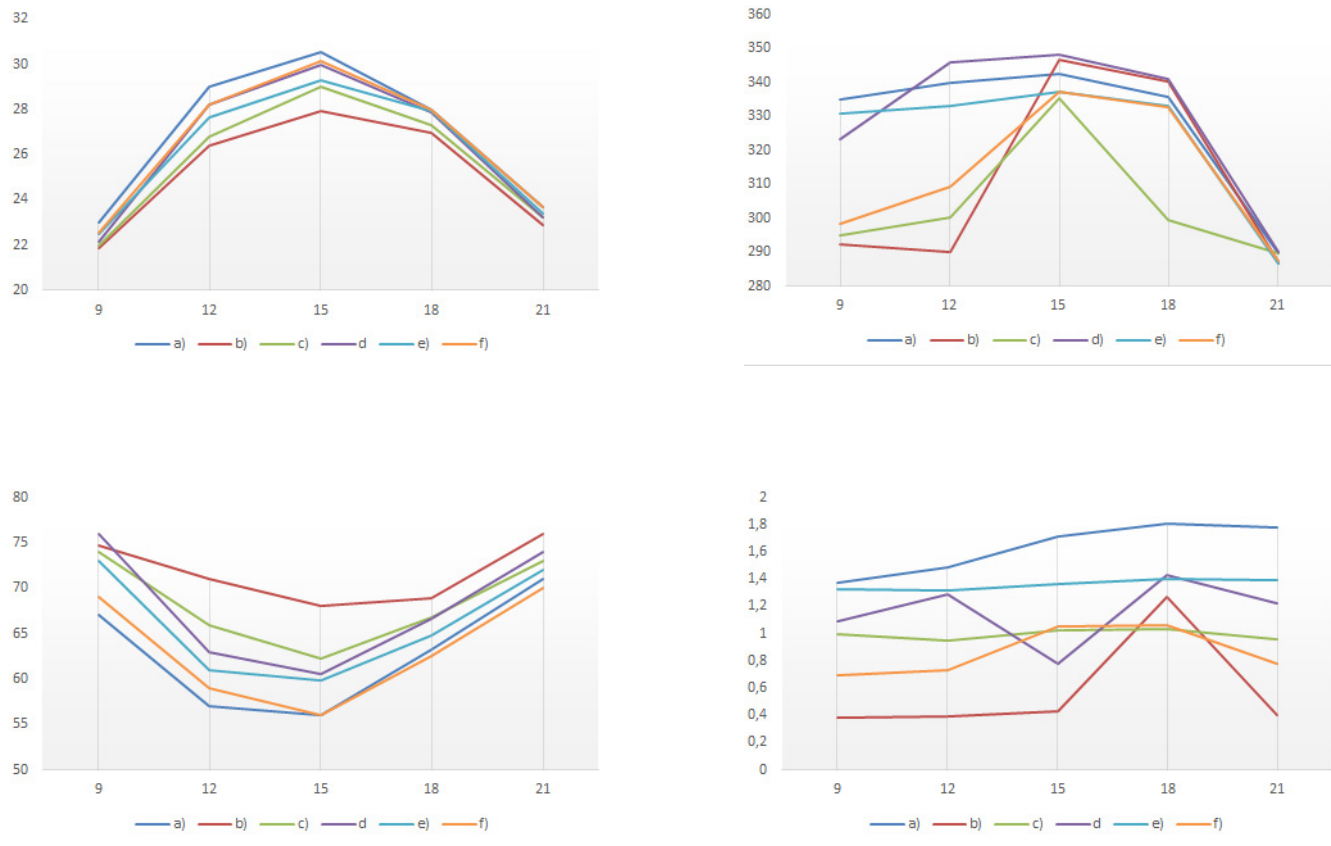


Figura 6. Parámetros climáticos entre las 9 y las 21 horas: a) Temperatura del aire (°C); b) Temperatura media radiante (°K); c) Humedad relativa (%); y d) Velocidad del viento predominante (m/s). Elaboración propia.

debido a que no disponen de ningún tipo de protección. La amplitud térmica media entre el valor mínimo que se registra a las 9:00 horas y el valor máximo que se obtiene a las 15:00 horas es de aproximadamente 8°C. La humedad relativa, sin embargo, tiene un comportamiento inverso a la temperatura, resultando más alta en las zonas con más vegetación y en las primeras y últimas horas del día, y más baja en las zonas de aparcamiento y en las horas más calientes. En cuanto al viento, se constata que su velocidad es más alta en las zonas sin protección.

La valoración del UTCI en verano muestra heterogeneidades en el confort, tanto a lo largo del día como en su distribución en el área. El rango de valoración va de una condición de *no thermal stress* en las primeras horas de la mañana a *very strong heat stress* a las 15:00 horas. A las 21:00 horas se observa una condición constante de *no thermal stress* en toda el área, mientras que en el transcurso del día las diferentes zonas muestran valores UTCI muy diversos. Las estaciones a y d son las que presentan condiciones más desfavorables encontrándose en estrés térmico durante la mayor parte del día. Las zonas ajardinadas son las que muestran unas condiciones más templadas, siendo la

estación c (zona de los bulevares) un verdadero oasis de frío en el área. No obstante, a las 15 horas toda el área se encuentra en una condición de *very strong heat stress*.

La evaluación con el AVS muestra algunos matices diferenciadores respecto del anterior. En primer lugar, la evaluación general es de confort térmico con algunos casos de desconfort por calor en las zonas más calientes a las 12:00 y a las 15:00 horas. Con el AVS se comprueba una subestimación de la sensación térmica, siendo el máximo igual a 1,27 y llegando hasta un valor inferior a 0, correspondiente a una sensación de frío.

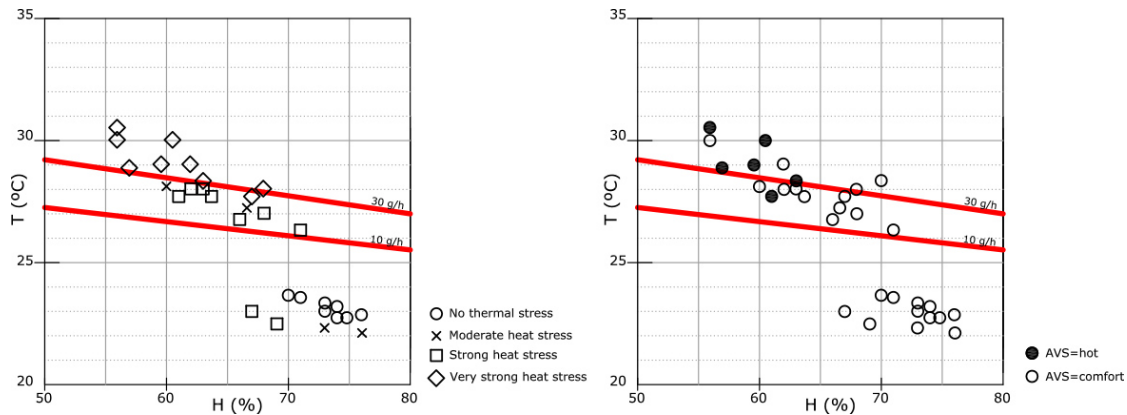


Figura 7. Comparativa entre el rango de sudoración, el UTCI y el ASV. Elaboración propia.

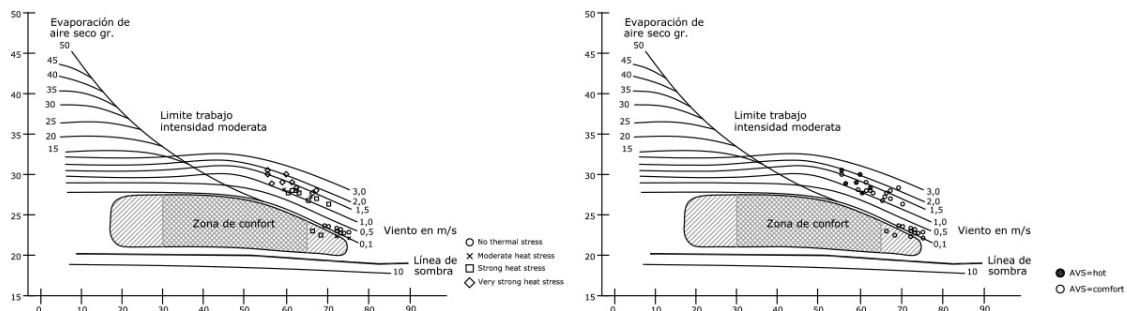


Figura 8. Comparativa entre el climograma de Olgay, el UTCI y el ASV. Elaboración propia.

COMPARACIÓN ENTRE ÍNDICES.

Como se ha dicho, para poder comparar los resultados y tener un rango de referencia de su aplicabilidad al caso de Madrid, los resultados se analizaron respecto a dos sistemas muy empleados: el rango de sudoración (Macho *et al.*, 2006) y la carta de Olgay (1998).

Según se advierte en la Figura 6, la mayoría de los valores de UTCI correspondientes al rango *very strong heat stress* se encuentran por encima de la tasa de sudoración de 30g/h, valor que se ha fijado como límite máximo. Entre las dos curvas de 30g/h y 10g/h, se ubica la mayoría de puntos de rango *strong heat stress* y por debajo del rango de sudoración de 10 g/h, las dos condiciones de *no thermal stress* y *moderate heat stress*, mostrando así una correlación muy cercana entre el sistema de Macho y el UTCI. En cuanto a ASV, la correlación no es igual de cercana, algunos valores que muestran un rango de sudoración superior a 30g/h se indican como estado térmico neutral, al igual que la mayoría de valores localizados entre las dos franjas (10g/h y 30g/h).

A partir de igual metodología se comparan las valoraciones del ASV y del UTCI con el climograma de Olgay, adaptado a las condiciones exteriores. El resultado del índice UTCI es bastante parecido a la comparativa anterior, observándose que los valores de *very strong heat stress* se encuentran por encima de la zona de confort, que la mayoría de los valores *strong heat stress* lo hacen en el límite superior del área de confort y que los valores pertenecientes a los otros dos rangos se hallan dentro del área de bienestar térmico (ver Figura 7).

Para el ASV la correspondencia con la carta de Olgay es inferior, evaluándose muchos de los valores que se encuentran por encima del área de confort como condiciones neutrales y otros, correspondientes a condiciones de calor, como dentro de la zona de confort. En general, se puede advertir que el ASV da una valoración subestimada de la condición de estrés térmico por calor, junto a una sensación térmica discordante con el climograma de bienestar de Olgay.

CONCLUSIONES

El trabajo realizado presenta una comparativa entre la aplicación de dos índices de confort adaptativo, el UTCI y el ASV, aplicados a un caso de estudio en Madrid. La finalidad de dicho estudio es comprobar la competencia de ambos índices en la definición del estrés térmico en clima templado seco y su adecuación al diseño de espacios urbanos, enfocado principalmente a la fase de toma de decisiones en los proyectos de mejoramiento bioclimáticos.

En relación a la definición del estrés térmico, la representación sobre los dos sistemas (rango de sudoración y Olgay) muestran que la valoración realizada con índice fisiológico UTCI es más acorde con las escalas de los modelos gráficos que la proporcionada por el ASV, puesto que el ASV lleva a cabo una subestimación del estrés térmico por calor, tanto en la comparativa con el rango de sudoración como con el climograma.

El análisis realizado muestra que el valor de temperatura UTCI tiene una escala amplia y diferentes rangos de evaluación a través de un número que representa una temperatura equivalente, permitiendo así un mayor detalle en la comparación de los resultados. Por contra, el ASV muestra una variación limitada a un rango (de confort a hot), entregando una evaluación poco representativa de las variaciones espaciales y a lo largo del día. Esto se debe a que la escala del AVS es muy pequeña y por eso poco representativa de las sutiles variaciones ambientales a nivel de la microescala urbana.

En resumen, se concluye que el UTCI demuestra aunar las características más adecuadas a la evaluación de confort ambiental exterior en climas templados cálidos como Madrid, por los siguientes aspectos:

Se calcula a partir de datos climáticos que pueden ser obtenidos de las observaciones *in situ* o de un proceso de cálculo, asociando a las condiciones ambientales la respuesta fisiológica del cuerpo humano.

Está basado en un modelo fisiológico complejo, que tiene en cuenta los procesos de adaptación física y fisiológica para un individuo aclimatado según la época del año.

Es representativo de la condición de bienestar para el clima de Madrid y, sobre todo, en verano.

Proporciona una evaluación sensible a las pequeñas variaciones microclimáticas, facilitando la comparación entre escenarios similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRÖDE, Peter, FIALA, Dusan, BŁAŻEJCZYK, Krzysztof, HOLMÉR, Ingvar, JENDRITZKY Gerd, KAMPMANN, Bernhard, TINZ, Birger y HAVENITH, George. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 2012, vol. 56, no. 3, pp. 481-494.

BRUSE, Michael. ENVI-met implementation of the Jacobs A – gs Model to calculate the stomata conductance (Working paper). In., 2004.

CENA, Krzysztof y CLARK, Jeremy Austin. *Bioengineering, thermal physiology and comfort*. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier, 1981.

COMMISSION FOR THERMAL PHYSIOLOGY OF THE INTERNATIONAL UNION OF PHYSIOLOGICAL SCIENCES, *Glossary of terms for thermal physiology*, *Journal of Thermal Biology*, 2003, vol. 28, nº 1, pp. 75-106

DE FREITAS, Chris. Assessment of human bioclimate based on thermal response. *International Journal of Biometeorology*, 1985, vol. 29, nº2, pp. 97-119.

DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN DE LA AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA DE ESPAÑA (ÁREA DE CLIMATOLOGÍA Y APLICACIONES OPERATIVAS) Y DEPARTAMENTO DE METEOROLOGÍA E CLIMA, I. D. M. D. P. *Atlas Climático Ibérico. Temperatura del aire y precipitación (1971-2000)*. Closas-Orcoyen S. L., 2011.

FARIÑA TOJO, José, FERNÁNDEZ ÁÑEZ, María Victoria, GALVEZ HUERTA, Miguel Ángel, HERNÁNDEZ AJA, Agustín y URRUTIA DEL CAMPO, Nagore. *Manual de diseño bioclimático: Manual de recomendaciones para la elaboración de normativas urbanísticas*. Bragança (Portugal), Instituto Politécnico de Bragança, 2013.

FERNÁNDEZ GARCÍA, Felipe, GALÁN, Encarna y CAÑADA TORRECILLA, Rosa. *Caracterización del régimen bioclimático medio del área metropolitana de Madrid, mediante la aplicación de la temperatura fisiológica (PET)*. Clima, Ciudad y Ecosistemas, 505-514. 2012

GIVONI, Baruch. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. New York: Van Nostrand Reinhold ed., 1998.

GONZÁLEZ NEILA, Francisco Javier. Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible: buenas prácticas edificatorias. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 2011, nº41, pp. 89-99.

GUERRA MACHO, José Julio; CECUDO LÓPEZ, José Manuel, MOLINA FÉLIX, José Luis, ÁLVAREZ DOMÍNGUEZ, Servando y VILA VELÁZQUES, Ramón. *Control climático de espacios abiertos: Evaluación del proyecto EXPO'92*. Ciemat, 1995.

HÖPPE, Peter y SEIDL, Hermann A.J. Problems in the assessment of the bioclimate for vacationists at the seaside. *International Journal of Biometeorology*, 1991, vol. 35, nº2, pp. 107-110.

HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature—a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 1999, vol. 43, nº2, pp. 71-75.

HÖPPE, Peter. Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort. *Energy and buildings*, 2002, vol. 34, n°6, pp. 661-665.

ISO 7730: 2005. 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. *Geneva: International Organization for Standardisation*, 2005.

JENDRITZKY, Gerd; DE DEAR, Richard y HAVENITH, George. UTCI—Why another thermal index? *International journal of biometeorology*, 2012, vol. 56, n°3, pp. 421-428.

JOHANSSON, Erik. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: a study in Fez, Morocco. *Building and environment*, 2006, vol. 41, n°10, pp. 1326-1338.

KOTTEK, Marcus, GRIESER, Jürgen, BECK, Christoph, RUDOLF, Bruno y RUBEL, Franz. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, vol. 15 (3), pp. 259-263.

NIKOLOPOULOU, Marialena y STEEMERS, Koen. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, 2003, vol. 35, n°1, pp. 95-101.

NIKOLOPOULOU, Marialena. *Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach*. Centre for Renewable Energy Sources, EESD, FP5, 2004.

NIKOLOPOULOU, Marialena y LYKOUDIS, Spyros. Thermal comfort in outdoor urban spaces: analysis across different European countries. *Building and Environment*, 2006, vol. 41, n°11, pp. 1455-1470.

NIKOLOPOULOU, Marialena y LYKOUDIS, Spyros. Use of outdoor spaces and microclimate in a Mediterranean urban area. *Building and environment*, 2007, vol. 42, n°10, pp. 3691-3707.

OLGYAY, Victor. *Desing with Climate*. 3rd ed. New Jersey: Princeton University Press ed., 1969.

SPAGNOLO, Jennifer y DE DEAR, Richard. A human thermal climatology of subtropical Sydney. *Int. J. Climatol.*, 2003, 23, pp. 1383-1395.

TUMINI, Irina. *El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid*. Tesis doctoral inédita, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.

TORNERO, José; PÉREZ CUEVA, Alejandro y GÓMEZ LOPERA, Francisco. Ciudad y confort ambiental: estado de la cuestión y aportaciones recientes. *Cuaderno de Geografía*, 2006, n°80, pp. 147-182.

TSELIU, Areti; TSIROSA, Ioannis; LYKOUDIS, Spyros; NIKOLOPOULOU, Marialena. An evaluation of three biometeorological indices for human thermal comfort in urban outdoor areas under real climatic conditions. *Building and Environment*, 2010, vol. 45, n°5, pp. 1346-1352.