

2

**Fundamentos físicos y
métodos de evaluación del confort climático
en los estudios de Bioclimatología humana**

Felipe Fernández García

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE MADRID

1. INTRODUCCIÓN: LA EVOLUCIÓN RECIENTE DE LA BIOCLIMATOLOGÍA HUMANA.

Los primeros índices bioclimáticos aparecen a finales del siglo XIX. Su objetivo era fijar las condiciones más adecuadas para el trabajo en las industrias mineras y textiles, en las que se producían frecuentes accidentes y enfermedades a consecuencia del calor y la humedad. En 1890, Vincent publicó una sencilla fórmula en la que hacía intervenir la temperatura de la piel y la velocidad del viento y a comienzos del siglo pasado, aparecen una serie de instrumentos dirigidos a medir «el poder refrigerante del aire» como el Kattathermómetro de Hill en 1923, el frigorímetro de Thilenius y Dorno's en 1925 y el frigorígrafo de Pfleiderer y Buettner's en 1935, entre otros. Es esta línea de investigación la que ha tenido una mayor continuidad e implantación en los estudios de bioclimatología. Su principal objetivo es conseguir un ambiente adecuado en el interior de los edificios, como lugares de vivienda o trabajo. No es extraño, por tanto, que los principales artífices de su desarrollo hayan sido los ingenieros y que los trabajos y publicaciones de la American Society of Heating Refrigeration and Air conditioning Engineers (ASHRAE) sean la base de los estudios sobre confortabilidad.

En la década de los 70 se produce un importante cambio coincidiendo con la crisis energética de aquellos años y la aparición de una corriente, denominada arquitectura bioclimática. Sus objetivos se centran en conseguir las mejores condiciones ambientales dentro del edificio, aprovechando al máximo las condiciones climáticas del entorno en el que se ubican. Arquitectos y Geógrafos comienzan a tomar protagonismo y la valoración del clima en términos de confortabilidad no se limita a las viviendas o edificios sino que se aplica a espacios muy diversos. Los trabajos de Olgyay (1963) y Givoni (1978), entre los arquitectos y los de Dauphine y Edelga (1971), Audierier et Izard (1980) y Besançonot (1987 y 1990) entre los geógrafos son muy representativos de esta nueva corriente surgida en el seno de la bioclimatología.

En la actualidad esta línea de investigación se ha visto reforzada por las previsiones del IPCC sobre el cambio climático y los efectos que sobre la salud podrían tener tales cambios. La ciudad es el escenario preferente por el elevado número de personas que habitan en ella y por las especiales condiciones climáticas que en ella se producen. Un grupo de trabajos trata de evaluar de qué modo el clima urbano afecta a la confortabilidad, aplicando los índices clásicos como el de Siple y Passel, el de Hill o el termohigrométrico

de Thom (Arroyo y Fernández, 1996; Pérez Cueva y Canet, 1998; Unger, J. 1999; Jáuregui et al., 1997; Fernández, 2001).

Otros, utilizan métodos más complejos que permiten no sólo caracterizar el confort en una zona determinada o con un tiempo concreto, sino también definir las medidas preventivas que deben ser tomadas para amortiguar los efectos cuando estos son negativos. Forman parte de una corriente, que algunos autores han denominado «confort adaptativo» (Auliciems, A. and Dear, R. 1998), surgida por las limitaciones que los índices clásicos presentan para integrar la dinámica cambiante del clima, la capacidad de adaptación y protección del hombre ante situaciones de desconfort y la posibilidad de modificar los parámetros ambientales. El punto de partida es el balance de intercambio energético entre el organismo y su ambiente; ello permite, por un lado, el análisis integrado de las múltiples variables que contribuyen al bienestar climático, pero también evaluar la incidencia de cada una de ellas en el resultado final. Especialmente interesantes han resultado estos modelos en el acondicionamiento de espacios abiertos (Pickup, J. and Dear, R., 1999; Álvarez et al. 1992), en la planificación urbana (Jendritzky, G. and Grätz, A., 1998) y en los estudios sobre la salud y la calidad ambiental en zonas urbanas (Höppe, P. 1999; Kalstein and Green, 1997 y Blazejczyk, 1994 y 1996), entre otros.

La utilización del balance de calor como punto de partida de todos estos modelos, hace necesario conocer los mecanismos físicos y fisiológicos que intervienen en este proceso. Por ello en las notas que siguen hemos intentado exponer de la forma más clara posible todos estos procesos, a fin de facilitar la comprensión y su utilización en los trabajos de clima urbano.

El trabajo se estructura en tres apartados: en el primero exponemos las principales características del organismo humano y los mecanismos internos de defensa y adaptación a las condiciones ambientales externas; en el segundo analizamos el balance de calor entre el cuerpo y su entorno, haciendo especial hincapié en la descripción y cuantificación de las diferentes variables que intervienen; por último, presentamos los índices y modelos de evaluación del confort, que en nuestra opinión, pueden ser más útiles en los estudios climáticos desde la óptica geográfica.

2. EL CONFORT TÉRMICO: MECANISMOS Y PROCESOS

2.1. DEFINICIÓN

La norma ISO 7730 de la American Society of Heating Refrigeration and Air conditioning Engineers, más conocida como ASHRAE, define el confort como «aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico». En ella se contemplan los dos componentes que contribuyen al confort: uno fisiológico, representado por el equilibrio térmico que debe existir entre el hombre y su ambiente exterior y otro psicológico que hace referencia al nivel de percepción del ambiente exterior que le conduce a la sensación de bienestar. Esta sensación, por tanto, depende de un gran número de variables, algunas de ellas no necesariamente relacionadas con el clima, pero es éste el que influye de manera más directa y el que admite una cuantificación más objetiva y ello por dos razones: la primera por el carácter homotérmico del organismo, que debe mantener su temperatura dentro de unos umbrales térmicos determinados; la segunda por la gran variabilidad del clima, debido a las constantes fluctuaciones atmosféricas, que obligan a un continuo proceso de adaptación del ser humano al medio cambiante.

Por todo ello, la caracterización del bienestar climático comprende tres fases de actuación: la primera es definir las variables fisiológicas que intervienen; la segunda, evaluar los procesos y mecanismos de adaptación a las condiciones ambientales y la tercera establecer de forma empírica las diferentes sensaciones que experimentan grupos de población diferenciados por género, edad y características sociales.

2.2. LA HOMOTERMIA Y LOS MECANISMOS INTERNOS DE REGULACIÓN DE LA TEMPERATURA

El primer aspecto que hemos de considerar a la hora de evaluar las condiciones de confortabilidad es el carácter homotérmico del cuerpo y la existencia de unos umbrales de tolerancia fuera de los cuales aumentan las sensaciones de malestar y pueden producirse efectos negativos para la salud. Para evitar esto, el organismo cuenta con un complejo sistema de regulación encargado de corregir las desviaciones que se producen como consecuencia, bien sea de un cambio en las condiciones externas al cuerpo humano, o de la propia actividad del hombre que puede generar un exceso de calor en el interior de su organismo.

Existen en nuestro organismo unos sensores capaces de captar las variaciones térmicas que se producen en el ambiente y transmitir señales al cere-

bro a fin de que se activen los mecanismos correctores pertinentes. Estos sensores están localizados en el hipotálamo y en la piel: el primero es un sensor de calor que comienza a actuar cuando la temperatura del interior del cuerpo sobrepasa los 37°C; en la piel se localizan los sensores de frío que se activan cuando la temperatura de la piel cae por debajo de 34°C. Tanto uno como otro envían impulsos al cerebro cuyo número depende de la intensidad y rapidez con que se produzca el enfriamiento o calentamiento. El cerebro interpreta las señales como una suma de impulsos positivos y negativos que se anulan entre sí. Si las señales de ambos signos son de la misma magnitud se sentirá térmicamente neutro, si no, se sentirá demasiado caluroso o demasiado frío y se activarán una serie de mecanismos internos para recuperar la neutralidad. Las dos reacciones más normales son:

- Cuando el cuerpo empieza a calentarse se inician dos procesos: uno, la dilatación de los vasos sanguíneos, incrementando el flujo de sangre por la piel, y otro, la segregación de sudor. El flujo sanguíneo es el principal mecanismo interno, encargado de corregir estas desviaciones; puesto que la sangre está compuesta principalmente por agua, el motor humano está eficazmente refrigerado por agua (Ramón, 1980). Si continúa el calentamiento aparece el sudor, el segundo mecanismo más efectivo de enfriamiento, puesto que la energía requerida para la evaporación es tomada de la piel.

- Si el cuerpo empieza a enfriarse, la primera reacción es la reducción del flujo de sangre por la piel, mediante la vaso-constricción de los conductos sanguíneos. Si esto no es suficiente, se produce un aumento de la producción interna de calor mediante la estimulación de los músculos.

El grado y la intensidad de este proceso de adaptación, permite diferenciar seis zonas delimitadas por unos umbrales térmicos, que son esenciales a la hora de evaluar las diferentes sensaciones de bienestar o disconfort (ASRHAE):

- *Zona de regulación vasomotora contra el frío:* Corresponde a un conjunto de condiciones ambientales en las que las pérdidas de calor de la piel activa los mecanismos internos de disminución del riego sanguíneo hacia la piel y los tejidos superficiales. Por debajo de ésta, el cuerpo genera calor a través de la tensión muscular, estremecimiento o actividad espontánea,

- *Zona de regulación funcional contra el frío:* Los mecanismos internos no son suficientes y es necesario ponerse más ropa o aumentar la actividad física a fin de aumentar la producción de calor interno.

- *Zona de enfriamiento*: Se produce cuando ninguna de las acciones anteriores tiene efecto y se pueden producir lesiones en el organismo: un descenso de 2°C por debajo de los 37° del interior del cuerpo origina pérdidas de eficiencia y una temperatura interior de 31°C puede ser letal.

- *Punto neutro*: Se denomina así al conjunto de condiciones ambientales para las que no se requiere ningún tipo de esfuerzo para mantener la temperatura del cuerpo.

- *Zona de regulación vasomotora contra el calor*: Las pérdidas de calor de la piel activa el riego sanguíneo hacia la piel y los tejidos superficiales hasta lograr que la temperatura de estas zonas se iguale a la de los tejidos internos.

- *Zona de regulación evaporativa*: Si la temperatura de la piel supera los 35°C, se activa la producción de sudor para su enfriamiento por evaporación. Está muy influenciada no sólo por la temperatura, sino también por los cambios en la humedad ambiental, la velocidad del viento o el vestido.

- *Zona de calentamiento*: El calor puede provocar daños cuando la temperatura interna sobrepasa los 37° y una temperatura interior superior a 43°C puede ser letal.

Estos límites pueden variar en función de la humedad y del viento, pero también de las características propias de cada individuo y de otros factores como el nivel de actividad o la aclimatación. A las altas temperaturas la tolerancia es mayor en aire seco que en húmedo y la sensación es intolerable a 50°C y una temperatura del punto de rocío de 25°C. A las bajas temperaturas, un descenso de 3° en la piel, equivalente a 0.5° en el interior del cuerpo, es el inicio de una sensación de disconfort y el límite de tolerancia al frío, incluso con ropa y para cualquier tipo de actividad, se sitúa en una temperatura exterior de -35°.

La ropa, por último, constituye un factor de protección contra el frío y el calor: en condiciones frías la ropa impide la pérdida de calor del organismo; en condiciones cálidas la ropa puede proteger del calor exterior y favorecer el intercambio entre la piel y la ropa. Si ésta es holgada, entre la ropa y la piel se crea un espacio en el que la temperatura del aire puede ser inferior a la de la piel y a la del aire exterior.

3- MODELIZACIÓN DEL BALANCE DE CALOR.

De lo que acabamos de exponer se deduce que el organismo humano está sometido a un continuo proceso de adaptación, a fin de compensar las pérdidas y ganancias de calor que se producen entre el cuerpo y su entorno inmediato, tal y como aparecen en el cuadro 1:

CUADRO 1
Procesos de intercambio de calor en el organismo (Olgay, 1998)

GANANCIAS	PÉRDIDAS
1. Calor producido por el organismo: Metabolismo Actividad Tensión muscular	
2. Absorción de la energía radiante: Directamente del sol o reflejada Del entorno	5. - Radiación hacia el exterior: hacia el cielo hacia los alrededores si se encuentran a una temperatura inferior
3. Conducción de calor hacia el cuerpo: Por el aire si éste tiene una temperatura superior a la de la piel Por contacto con objetos calientes	6. - Conducción de calor hacia el exterior: por convección cuando la temperatura del aire es inferior a la de la piel Por contacto con objetos más fríos
4. Calentamiento por condensación del sudor en la piel.	7. - Por evaporación: Procedente de la respiración. Procedente de la evaporación generado en la piel

Los diferentes procesos se resumen en la ecuación del balance de calor entre el cuerpo y el exterior, cuya expresión es:

$$M + \Delta R + \Delta C - E = S \text{ (W/m}^2\text{)} \quad (1)$$

En ella, el primer término representa el calor interno producido por la ingestión de alimentos y su combustión y la actividad desarrollada; R, C y E son los flujos de calor que se establecen entre el cuerpo y el ambiente mediante radiación, convección y evaporación.

S, representa el almacenamiento neto de calor. Si su valor es cero el cuerpo se encontrará en situación de neutralidad térmica, por tanto de confortabilidad; si es negativo precisará mecanismos de defensa contra el frío; si es positivo se activarán los mecanismos de defensa contra el calor, mediante la generación de sudor en la piel.

Los resultados de esta ecuación constituyen un buen indicativo del esfuerzo de adaptación a que se ve sometido el organismo en diferentes ambientes climáticos; también suministra la información necesaria para deter-

minar qué tipo de medidas correctoras se podrían tomar, tales como la vestimenta más adecuada o arbolado, superficies de agua y cubiertas en las calles.

Las características de cada una de estas variables y los mecanismos que las relacionan son claves para comprender el complejo sistema de interrelaciones que se establecen entre ellas y que, en definitiva, permiten evaluar el balance de calor entre el cuerpo y su entorno. Como señala Alvarez et al (1992) «La descripción matemática del balance de energía del cuerpo humano es una combinación racional/empírica de ecuaciones que tratan de aproximarse al comportamiento real del cuerpo. De este modo se usa la teoría de transferencia de calor para describir los mecanismos de intercambio sensible y latente y expresiones empíricas para calcular los valores de coeficientes de intercambio y parámetros fisiológicos que son difíciles de estimar teóricamente».

Es la energía producida por la transformación de energía química que tiene lugar dentro del organismos. Esta energía (M), es en parte utilizada para realizar un trabajo (W). La diferencia entre la energía producida y la consumida (M-W) constituye una generación interna de calor que ha de ser disipada hacia el exterior, a fin de mantener la temperatura constante del organismo. La parte de la energía metabólica empleada en realizar un trabajo depende de la eficiencia mecánica, cuyo valor es muy bajo. Por ello en la mayor parte de los modelos se considera 0 y la expresión M-W queda reducida al valor de M.

La actividad metabólica puede ser expresada en W/m^2 o en «met», cuyo valor unitario es de $58.2 W/m^2$ o $50 kcal/m^2/h$. Este valor es el que corresponde a la energía liberada por un individuo sentado en reposo.

3.1. METABOLISMO O CALOR METABÓLICO (M)

En la elección de las condiciones óptimas para el confort y la salud es necesario conocer el tipo de actividad que se está realizando, puesto que la producción de calor del cuerpo aumenta en proporción a la intensidad del ejercicio (cuadro 2).

3. 2. INTERCAMBIO DE CALOR POR CONDUCCIÓN

Es la transferencia de calor que se produce desde la piel hasta la superficie exterior de la ropa. Depende de la diferencia entre la temperatura de la piel (tsk) y la de la ropa (tcl), así como del aislamiento efectivo de la ropa (Icl):

$$C = 0.155Icl (tsk-tcl) \quad (2)$$

CUADRO 2
Clasificación del esfuerzo físico (ASHRAE)

Clasificación	Met
Muy ligero	1.6
Ligero	1.6 a 3.3
Moderado	3.3 a 5
Pesado	5 a 6.7
Muy pesado	6.7 a 8.3
Super pesado	8.3 a 10
agotador	superior 10

(Más detalle en Apéndice I.)

El aislamiento o resistencia térmica de la ropa se mide en unidades clo, que representa el aislamiento efectivo proporcionado por un traje normal de oficina, usado por un trabajador sedentario en un ambiente interior confortable. El valor de un clo se fija convencionalmente en $0.155 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Experimentos realizados con maniquíes o medidas directas sobre personas, han permitido estimar los valores individuales para diferentes prendas de ropa (I_{cli}), tal y como las reproducidas en el apéndice 2. A partir de estos valores individuales, I_{cl} se calcula como:

$$I_{cl} = 0.524 \sum I_{cli} + 0.056. \quad (2.1)$$

La temperatura de la piel depende de la temperatura del interior del cuerpo y de la producción interna de calor (M) y se expresa en $^\circ\text{C}$:

$$t_{sk} = 29.55 + 0.196 * t_a - 1.064 * M * (1 - 0.295 I_{cl}) \text{ (en } ^\circ\text{C)} \quad (2.2)$$

- t_a es la temperatura del aire ambiente en $^\circ\text{C}$,
 - M es el calor metabólico expresado en met
 - I_{cl} la resistencia térmica de la ropa expresado en clo, según la expresión anterior
- mente expuesta (2.1).

La temperatura de la ropa (t_{cl}) depende de la temperatura de la piel (t_{sk}), la temperatura del aire (t_a) y del área del cuerpo cubierta por la ropa, representada por el factor f_{cl} :

$$t_{cl} = t_{sk} - 0.155 I_{cl} [0.71 f_{cl} (t_{sk} + t_a)] \quad (2.3)$$

– fcl es un coeficiente que mide la relación entre el área cubierta por la ropa y el área desnuda. Para un hombre completamente desnudo el valor es 1 y aumenta a medida que lo hace la superficie del cuerpo vestida (Cuadro 3). Depende del aislamiento efectivo de la ropa Icl y el valor medio puede ser considerado como:

$$fcl = 1 + 0.25Icl. (2.4)$$

CUADRO 3
Valores de Icl y fcl obtenido a partir de los valores correspondientes a los artículos individuales reproducidos en el Apéndice II.

	Factor ropa	
	Icl (clo)	fcl
Desnudo	0	1
Pantalón corto	0,1	1
Pantalón y camiseta	0.3/0.4	1,05
Pantalón largo ligero y camiseta	0,5	1,1
Chandal y ropa deportiva	0,6	1,1
Traje con ropa interior ligera	1	1,15
Traje y ropa interior pesada	1,5	1,2

3. 3. INTERCAMBIO DE CALOR POR CONVECCIÓN

Representa una ganancia de calor para el cuerpo si la temperatura de éste es menor que la del aire que le rodea o una pérdida en caso contrario.

Depende de la diferencia de temperatura entre la ropa y el aire exterior; de un coeficiente de transferencia de calor cuyo valor depende de la velocidad del viento y de la porción de superficie de la piel cubierta por la ropa, representado por el factor fcl.

$$C = hc * fcl * (tcl - ta) (3)$$

– hc es el coeficiente de transferencia de calor por convección, que depende de la diferencia de temperatura entre la superficie de la ropa y la del aire y de la velocidad del viento, cuando esta es mayor de 0.1 m/s. :

si $V < 0.1$ m/s $hc = 2.38 * (tcl - ta) (3.1)$

si $V > 0.1$ m/s $hc = 12.1 * \text{raiz cuadrada de } V. (3.2)$

– fcl tiene el mismo significado que en (2.4).

3. 4. INTERCAMBIO DE CALOR POR RADIACIÓN

El intercambio de calor por radiación, en un individuo situado al sol, depende de la insolación y de la temperatura de las superficies que le rodean, conocida como temperatura media radiante (t_{mr}). Los flujos de calor por radiación, por tanto, pueden ser de dos tipos:

3.4.1. LA RADIACIÓN DE ONDA CORTA (R_c), que representa la fracción de la energía solar incidente absorbida directamente por la piel. Depende, por tanto, de la radiación incidente y de las características de la ropa y para individuos a la sombra su valor es nulo

$$R_c = (a_{sk} \cdot t_{rancl} \cdot R_{inc}) / f_{cl} \quad (4)$$

- a_{sk} es la absorptividad de la piel
- t_{rancl} , la transmisividad de la ropa y
- f_{cl} o porción del cuerpo vestido, que ya vimos anteriormente (2.4).

3.4.2. LA RADIACIÓN DE ONDA LARGA (R_l), representa el flujo radiante perdido o ganado por la superficie externa del individuo. Depende de la diferencia entre la temperatura de la ropa y la radiante, así como de un factor de transferencia por radiación (h_r) y de la porción de cuerpo cubierta (f_{cl}).

$$R_l = h_r \cdot f_{cl} \cdot (t_{cl} - t_{rm}) \quad (5)$$

– h_r es un coeficiente de transferencia de calor por radiación, depende de la emisividad de la ropa. El valor más corrientemente utilizado es $0.95 \cdot 4.7$.

La temperatura media radiante difiere sensiblemente de la del aire para personas sometidas a radiación directa. Numerosas aplicaciones en las que se evalúa el confort a la sombra, asumen que ambas temperaturas son iguales. Sin embargo, la experiencia muestra que en las zonas urbanas, incluso a la sombra, la sensación térmica está muy influida por la radiación emitida por el asfalto, las paredes y demás materiales que conforman el ambiente en los cañones urbanos.

3. 5. PÉRDIDAS DE CALOR POR EVAPORACIÓN

La evaporación determina una pérdida de calor latente del cuerpo y tiene lugar, por la respiración y por la evaporación del sudor generado en la superficie de la piel.

3.5.1. PÉRDIDAS POR EVAPORACIÓN EN LAS VÍAS RESPIRATORIAS

El intercambio de calor en las vías respiratorias se puede desglosar en dos términos: un intercambio de calor sensible (C_{res}) y otro latente (E_{res}). El primero depende de la diferencia de temperatura entre el aire expulsado y el exterior; el segundo de la diferencia de concentración de vapor de agua entre el aire ambiente y el que se expulsa por los pulmones. Las variables que intervienen son:

- El calor metabólico expresado en W/m^2 (M)
- La temperatura del aire en $^{\circ}C$ (t_a)
- La humedad relativa, expresada en % o en fracción decimal, según los modelos (H_r)
- La presión del vapor de agua a la temperatura ambiente, expresada en kPa o hPa. (P_{va}).

$$C_{res} = 0.0014 * M * (34 - t_a) \quad (6)$$

$$E_{res} = 0.0173 * M * (5.8 - H_r - P_{va}) \quad (7)$$

3.5.2. PÉRDIDA DE CALOR POR EVAPORACIÓN CUTÁNEA (E_{sk})

El flujo de calor latente debido a la evaporación de agua en la piel E_{sk} varía entre dos niveles, uno mínimo denominado EDIF y otro máximo EMX:

EDIF corresponde a la evaporación de la humedad permanente de la piel; se produce sin generar sudor y, depende de la temperatura de la piel y del estado higrométrico de la atmósfera.

EMX representa el valor máximo de pérdida de calor por evaporación cuando la piel está completamente cubierta de sudor.

Ambos parámetros dependen de la capacidad evaporante de la atmósfera y de las características de la ropa, relacionadas según la siguiente ecuación (ASHRAE, p.24 y ss):

$$E_{max} = 16.7 * hc * fpcl * (P_{v_{tsk}} - (H_r * P_{v_{ta}})) \quad (7.1)$$

16.7 es la relación de Lewis,

hc coeficiente de transferencia de calor, definido en (3.1 y 3.2),

P_v es la presión del vapor de saturación a la temperatura de la piel y del aire, expresada en kPa

H_r la humedad relativa del aire, en fracción decimal;

fpcl es un factor de permeabilidad de la ropa, relacionado con el aislamiento (I_{cl}) y el coeficiente de transferencia de calor (hc). Su valor es:

$$fpcl = 1 / (1 + 0.143 * hc * Icl) \quad (7.2)$$

Para una persona desnuda su valor es la unidad y para ropa completamente impermeable es cero.

3.5.3. EVAPORACIÓN REQUERIDA Y TRANSPIRACIÓN REGULADORA

Como señalamos anteriormente, el sudor es el mecanismo más eficaz para perder calor, por ello cuando el balance de calor entre el organismo y el ambiente es positivo, el excedente se transforma en sudor. El valor resultante como cierre del balance de calor (E_{RQ}) indica el grado de sudoración requerida para mantener el equilibrio térmico en el interior del cuerpo (expresado en gr/h) y la pérdida de calor por evaporación (en W/m^2) necesaria para mantener las condiciones de confortabilidad.

$$E_{RQ} = M - (C_{res} + E_{res}) - (C + R_l + E_{dif}) + R_c \quad (8)$$

El sudor realmente evaporado (E_{rsw}) y que contribuye al enfriamiento efectivo depende del *rendimiento del proceso de evaporación o eficacia evaporativa* (η), que, a su vez depende de la superficie de la piel cubierta por sudor (w). Por tanto, el sudor realmente evaporado se obtiene:

$$E_{rsw} = E_{RQ} * \eta \quad (8.1)$$

y la eficacia evaporativa:

$$\eta = 1 - 0.42 * e^{(-6 * 1 - w)} \quad (8.2)$$

– w representa la superficie de la piel cubierta por sudor. Su valor oscila entre 1 y 0, dependiendo del nivel de actividad y de la temperatura de la piel. En el apéndice IV aparecen los valores correspondientes a este parámetro.

Aunque el máximo teórico es la unidad (la piel al 100% cubierta de humedad), la realidad muestra que la proporción de superficie de la piel cubierta de humedad difícilmente alcanza ese valor.

w oscila entre 0.06 y 0.8 y la evaporación que realmente se produce es menor (en el apéndice IV se dan los valores de w en función del nivel de actividad). La relación entre la cantidad de calor requerido y la que realmente se produce constituye por sí mismo el mejor índice fisiológico de estrés térmico al que se ve sometido el organismo en condiciones cálidas. Más adelante haremos referencia a varios índices de tensión térmica utilizados a partir de estos parámetros (véase apartado IV.2.3).

En el caso de que la capacidad evaporativa de la atmósfera lo permita, la producción de sudor puede equilibrar el balance, pero provocando situaciones de desconfort o malestar térmico. Estudios realizados ponen de manifiesto que el hombre puede llegar a sudar hasta 1 litro de agua a la hora por un periodo de tiempo ilimitado (Belding y Hatch en Ramón, 1980). Esto representa una disipación de calor equivalente a 700 W, que se toma como valor máximo admisible.

En espacios cerrados, sudar equivale a sensación de desconfort, pero en espacios abiertos este proceso puede disminuir la sensación de malestar, siempre y cuando se mantenga dentro de unos umbrales admisibles. Así, en el acondicionamiento del recinto de la EXPO en Sevilla, niveles de sudación de 60 g/h en zonas de estancia y hasta 90 g/h en zonas de paso como umbrales se consideraron admisibles (Álvarez et al. 1992).

4- MÉTODOS DE EVALUACIÓN DEL CONFORT.

El objetivo final de las investigaciones en el campo de la bioclimatología es cuantificar las sensaciones térmicas y establecer escalas, que permitan determinar las respuestas de la persona ante unas condiciones climáticas específicas. Todos los investigadores utilizan una metodología similar, consistente en el análisis combinado de las diversas variables climáticas que condicionan la sensación térmica. Con ellos se definen diversas categorías de sensaciones, que van desde las muy frías a las muy cálidas. Los índices más sencillos combinan la temperatura y el viento, la temperatura y la humedad o las tres variables; los más complejos utilizan el balance de intercambio térmico, para definir las diferentes sensaciones.

La mayor parte de estos índices presentan serias limitaciones a la hora de aplicarlos a espacios abiertos. La primera deriva de que la mayor parte de los índices se han realizado para el acondicionamiento de espacios interiores en los que se pueden controlar las diferentes variables que influyen sobre el confort. Fuera del edificio la situación es bastante más compleja y necesariamente han de intervenir otros factores; entre ellos el más importante es la adaptación de la población a las condiciones climáticas típicas de la zona y, por ello, los umbrales de confortabilidad deberían adecuarse a estas características climáticas. La segunda, por el carácter estático de estos índices que no consideran de forma adecuada las modificaciones que sobre el confort introducen el tipo de actividad, la ropa o las mismas condiciones climáticas, muy variables todas ellas, tanto en el tiempo como en el espacio.

Por estas razones, como señalábamos en la introducción, van ganando terreno los modelos basados en el balance de intercambio energético. Con ellos se logra una mejor integración de las variables ambientales en espacios abiertos (como el viento, la radiación o temperatura radiante al nivel de calle); pueden ser utilizados para la predicción de situaciones de riesgo para la salud, como olas de frío o calor, o suministrar información sobre el tipo de vestimenta más adecuado en los desplazamientos a otras zonas, por trabajo o placer. También constituyen una herramienta importante para corregir aquellos elementos del entorno que inciden negativamente sobre el confort, especialmente útil en la planificación de las áreas urbanas.

Como muestra, presentamos algunos de los índices que consideramos más representativos o los de más amplia utilización por los geógrafos. Los hemos agrupado en dos grandes conjuntos: Los índices basados en la acción combinada de variables meteorológicas y los derivados del modelo de equilibrio energético del hombre con su entorno.

4.1. ÍNDICES BASADOS EN LA ACCIÓN COMBINADA DE VARIABLES CLIMÁTICAS

4.1.1. TEMPERATURA EFECTIVA

La temperatura efectiva tiene su origen en los estudios de Houghten y Yaglou realizados en 1923 y, con varias modificaciones, es la base de la mayor parte de los índices de confort actualmente vigentes. Representa las sensaciones resultantes de combinar la temperatura del termómetro seco y húmedo con el viento sobre personas sedentarias en ambientes interiores.

La denominada temperatura efectiva corregida, es la temperatura registrada por el termómetro seco en un recinto uniforme a una temperatura del 50%, en el que se produce el mismo intercambio térmico neto por radiación, convección y evaporación que en las humedades variables del medio ambiente exterior. Las escalas correspondientes a estos valores se refieren a una ropa de 0.6 clo, aire en calma (0.2 m/s), una exposición de 1 hora y una actividad equivalente a 1 met.

Experimentos posteriores, llevados a cabo en la Universidad del estado de Kansas, por encargo del ASHRAE, sobre 1600 estudiantes dieron las siguientes correlaciones de sensación térmica: (ver cuadro)

4.1.2 ÍNDICE DE ENFRIAMIENTO DEL VIENTO (WIND CHILL)

Describe el grado de pérdida de calor de un cilindro con un litro de agua a 33°C (valor que corresponde a la temperatura de la piel), en función de la

exposición en horas	sexo	ecuaciones de regresión
1	varón	$y = 0.220t + 0.233P - 5.673$
	mujer	$y = 0.272t + 0.248P - 7.245$
	asociados	$y = 0.245t + 0.248P - 3.475$
2	varón	$y = 0.221t + 0.270P - 6.024$
	mujer	$y = 0.283t + 0.210P - 7.694$
	asociados	$y = 0.262t + 0.240P - 6.859$
3	varón	$y = 0.212t + 0.293P - 8.622$
	mujer	$y = 0.275t + 0.255P - 8.622$
	asociados	$y = 0.243t + 0.278P - 6.802$

- t es la temperatura en °C y P la presión del vapor en kPa.

- Los valores de Y se expresan en categorías que van desde -3 a +3: frío; -2, fresco; -1, ligeramente fresco; 0, confortable; +1, ligeramente cálido; +2, cálido y +3 muy cálido.

temperatura ambiente y la velocidad del viento. Está basado en el índice de Siple y Passel, publicado en 1945 y obtenido a partir de los experimentos realizados en la «Second Byrd Expedition Antartica», llevada a cabo entre 1939 y 1940.

$$WCI = (10 \cdot \sqrt{V} + 10.45 - V) \cdot (33 - t_a), \text{ kca/m}^2$$

- V es el viento, medido en la garita, en m/s.

- t_a la temperatura del aire en °C.

- 33 es la temperatura de la piel.

Los resultados indican la pérdida de energía por unidad de área y las sensaciones térmicas para una persona con ropa equivalente a 4 clo son las siguientes:

superior a 2326.0	extremadamente frías
entre 2326.0 y 1628.3	muy frías
entre 1628.0 y 930.5	frías
entre 930.5 y 581.6	frescas
entre 581.6 y 232.7	confortables
entre 232.7 y 116.4	cálidas
entre 116.4 y 58.3	muy cálidas
por debajo de 58.3	extremadamente cálidas

A fin de facilitar la interpretación de los resultados del índice, se utiliza la denominada «temperatura de frío del viento equivalente», expresada en °C y que puede ser definida como la temperatura ambiente que para un viento de referencia de 2 m/s, (equivalente a una persona caminando a 6 km/h), produce el mismo enfriamiento.

$$T_{wci} = (-0.04544 * WCH + 33) \text{ en } ^\circ\text{C}$$

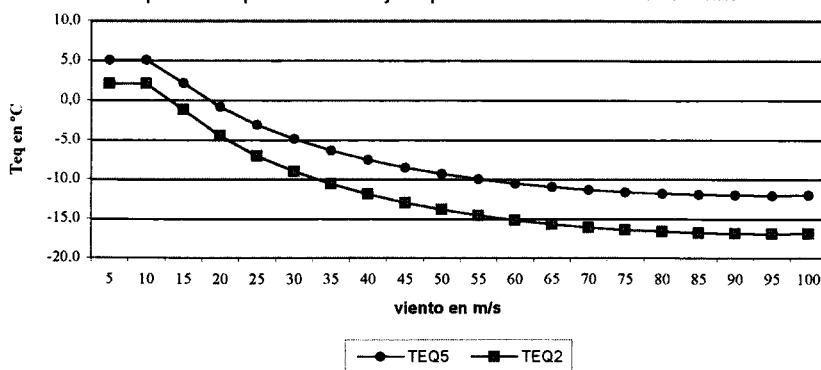
Es un buen indicativo de las sensaciones en climas fríos o muy fríos, aunque ha sido uno de los primeros y, quizás, el más utilizados por los geógrafos en nuestro país, tanto en estudios de carácter regional (Alonso et al. 1985), como en estudios de climatología urbana en Zaragoza (Calvo, 1976), Madrid (Arroyo y Fernández, 1991; Córdoba (D. Bascón, 1999) entre otros.

Los resultados son válidos para velocidades inferiores a 80 km/h, por encima de los 90 km/h el valor se mantiene estable, tal y como se muestra en el cuadro 4 y en el gráfico 1.

CUADRO 4
Valores de WCI en kcal/m² y temperaturas equivalentes a 5°C y 2°C, con diferentes velocidades del viento

Vm/s	WCI(5°C)	Twci (5°C)	WCI (2°C)	Twci(2°C)
0.00	292.6	5.0	324.0	2.0
1.39	583.7	5.0	646.2	2.0
2.78	681.5	2.0	754.5	-1.3
4.17	747.5	-1.0	827.6	-4.6
5.56	797.0	-3.2	882.4	-7.1
6.94	836.0	-5.0	925.6	-9.1
8.33	867.6	-6.4	960.5	-10.6
9.72	893.4	-7.6	989.2	-11.9
11.11	914.8	-8.6	1012.8	-13.0
12.50	932.5	-9.4	1032.5	-13.9
13.89	947.2	-10.0	1048.7	-14.7
15.28	959.3	-10.6	1062.0	-15.3
16.67	969.0	-11.0	1072.9	-15.8
18.06	976.8	-11.4	1081.5	-16.1
19.44	982.8	-11.7	1088.1	-16.4
20.83	987.3	-11.9	1093.1	-16.7
22.22	990.3	-12.0	1096.4	-16.8
23.61	992.0	-12.1	1098.3	-16.9
25.00	992.6	-12.1	1099.0	-16.9
26.39	992.1	-12.1	1098.4	-16.9

GRÁFICO 1
Temperaturas equivalentes a 5°C y 2°C para diferentes velocidades del viento



4.1.3. ÍNDICE DE HILL

Es muy similar a la anterior, pero tiene en cuenta, además, la humedad del aire representada por la temperatura del termómetro húmedo.

La ecuación propuesta por Hill, a partir de experimentos realizados con el katatermómetro, es:

$$H_{\text{Hill}} = (0.37 + 0.51 * V^{0.63}) * (36.5 - t_h)$$

t_h es la temperatura del termómetro húmedo y 36.5 es la temperatura del cuerpo.

Los valores resultantes se expresan en $\text{mcal/cm}^2/\text{seg}$. y la escala de sensaciones es:

H en $\text{mcal/cm}^2/\text{seg}$	Sensación
inferior a 5	cálido
de 5.1 a 10	suave
de 10.1 a 15	fresco
de 15.1 a 22	frio
de 22.1 a 30	muy frío
superior a 30	extremadamente frío

En 1974 Garmendia y en 1985 Mateos Cañizal y Rodríguez Puebla modificaron la formulación inicial de Hill, con objeto de obtener un índice de bienestar climático que se adecuara a las condiciones climáticas de la Península Ibérica.

El proceso, cuya descripción detallada puede consultarse en las obras de los autores citadas en la bibliografía, se resume en tres pasos consecutivos:

– En el primero se obtiene el poder de enfriamiento (H_{adaptado}) sin tener en cuenta la humedad. Es decir las pérdidas de calor en función de la velocidad del viento, la temperatura del aire y la del cuerpo, a partir de la siguiente ecuación:

$$H = [(0.9311 + 0.0295 V^n) * (36.5 - t)].$$

Los valores resultantes se expresan en Wm^2 .

– A continuación se calcula la Temperatura aerodinámica (T_a), expresada en $^{\circ}\text{C}$ y ajustada a un viento de referencia de 2 m/s.

$$T_a = 36.5 - [H / (0.9311 + 0.0295 V_r^n)]$$

Cuando el viento medido en la garita es igual o inferior al de referencia, la temperatura aerodinámica es igual a la del aire; cuando el viento es superior a 2 m/s, T_a es inferior a la del aire (cuadro 5).

– por último se obtiene la temperatura de confort (T_b) como la media aritmética de la temperatura aerodinámica y la del termómetro húmedo:

$$T_b = (T_a + t_h) / 2$$

Las variables necesarias para el cálculo del índice de Hill, son:

- T_a es la temperatura aerodinámica
- t es la temperatura del aire en °C
- t_h es la temperatura del termómetro húmedo
- V la velocidad del viento medido en la garita, en m/s
- V_r el viento de referencia (2 m/s).
- n es un coeficiente cuyo valor depende de la temperatura del aire ambiente.

En la versión adaptada a la Península, n toma la siguiente expresión:

$$n = 0.6 * \exp(-0.01t)$$

Los valores de T_b se dan en °C y su equivalencia en sensaciones de confort aparecen en el siguiente cuadro:

SENSACIÓN		TB
Muy frío	mF	Inferior a -5
Frío	F	Entre -5 y 1
Fresco	f	Entre 1 y 6
Suave	s	Entre 6 y 12
Cálido	c	Entre 12 y 18
Muy cálido	mc	Entre 18 y 24
Bochornoso	b	Superior a 24

4.1.4. ÍNDICE TERMOHIGROMÉTRICO DE THOM (HUMIDEX)

Elaborado por Thom en 1959, indica la temperatura que con aire en calma y saturado, provocaría en una persona en reposo la misma sensación que la temperatura y humedad reales.

$$THI = t - (0.55 - 0.0055Hr) * (t - 14.5).$$

CUADRO 5

Valores de H, Ta y Tb para una temperatura de 20°C, cuando varía la velocidad del viento (V) y la humedad (th).

t	th	V	n	H	Ta	Tb
20.0	15.0	2.0	0.49	16.0	20.0	17.5
20.0	15.0	4.0	0.49	16.3	20.0	17.5
20.0	15.0	6.0	0.49	16.5	19.7	17.4
20.0	15.0	8.0	0.49	16.7	19.5	17.2
20.0	15.0	10.0	0.49	16.9	19.3	17.2
20.0	15.0	12.0	0.49	17.0	19.2	17.1
t	th	V	n	H	Ta	Tb
20.0	10.0	2.0	0.6	16.1	20.0	15.0
20.0	12.0	2.0	0.6	16.1	20.0	16.0
20.0	14.0	2.0	0.6	16.1	20.0	17.0
20.0	16.0	2.0	0.6	16.1	20.0	18.0
20.0	18.0	2.0	0.6	16.1	20.0	19.0
20.0	20.0	2.0	0.6	16.1	20.0	20.0

– t es la temperatura del aire en °C

– Hr la humedad relativa en %

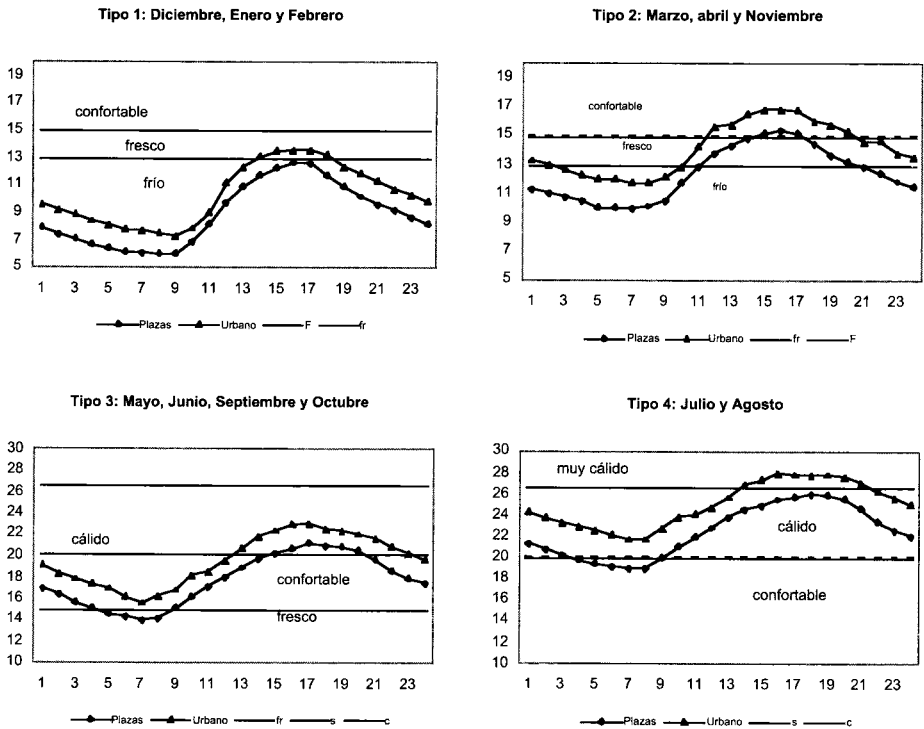
Los resultados se dan en °C y las sensaciones asociadas a ellas son las siguientes:

Sensación	THI
Muy frío	Entre -9.9 y -1.8
Frío	Entre -1.7 y +12.9
Fresco	Entre 14 y 14.9
Suave	Entre 15 y 19.9
Cálido	Entre 20 y 26.4
Muy cálido	Entre 26.5 y 29.9
Bochornoso	Superior a 30

Se ha utilizado en numerosos trabajos para evaluar las diferencias entre los espacios rurales y urbanos en diversas ciudades europeas (Unger, J., 1999), en la ciudad de Méjico (Jáuregui et al. 1997). En Madrid lo hemos aplicado este índice para establecer las diferencias entre el confort térmico de la ciu-

dad y las áreas próximas no urbanas; así como para evaluar la incidencia de las diferentes estructuras urbanas sobre el confort dentro de la ciudad. También se ha caracterizado el régimen de confort medio horario, tal y como aparece en la figura 2 (Fernández García, F. 2001c)

GRÁFICO 2
Régimen medio de confort en Madrid, según el índice THI



4.2. ÍNDICES OBTENIDOS A PARTIR DEL BALANCE DE CALOR

4.2.1. ECUACIÓN DE CONFORT DE FANGER

Fanger intentó generalizar la base fisiológica del confort a fin de poder predecir analíticamente las diferentes sensaciones para cualquier actividad y cualquier combinación de factores ambientales. Las dos variables que definen el confort son, la temperatura de la piel (t_{sk}) y la tasa de sudor requerido (E_{rsw}), de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$tsk = 35.7 - 0.0372 * M$$

$$E_{rs} = 0.42 * (M - 58.2)$$

En las que M y E_{rs} están expresado en W/m² y tsk en °C.

Para una persona en reposo (actividad 1 met o 58.2 W/m²), los valores de confort para tsk son 34°C y la tasa de sudor 0. Para una actividad mayor, la temperatura de la piel disminuye, al tiempo que aumenta la tasa de sudación.

Posteriormente, entre 1967 y 1970, Fanger estableció otros dos índices, también muy utilizados, a los que denominó PMV (Predicted Mean Vote) y PPD (porcentaje previsto de disconfort). El primero indica la sensación térmica experimentada por un amplio número de sujetos; el segundo estima el % de individuos que estarían fuera de las condiciones de confort para un valor de PMV.

La expresión que permite evaluar la sensación es:

$$PMV = (0.303 * e^{(-0.036 * M) + 0.028}) * S$$

- S es el resultado del balance tal y como aparecen en la ecuación 1
- M, la producción de calor metabólico en W/m²

El porcentaje de personas insatisfechas se obtiene:

$$PPD = 100 - [0.5e^{(-0.335 * PMV^4 + 0.218 * PMV^2)}]$$

La escala de sensaciones es la misma que la presentada en el apartado IV.1.1, e incluye siete situaciones numeradas desde -3 para las muy frías a +3 para las muy cálidas:

valores	sensaciones
-3	frío
-2	fresco
-1	confortable fresco o ligeramente fresco
0	confortable o neutro
1	confortable cálido o ligeramente cálido
2	cálido
3	caluroso

4.2.2. ÍNDICES DE TENSIÓN TÉRMICA

Dos son los más importantes el índice de estrés térmico o «*Heat Stress Index*» (HSI) y el *Índice de Tensión Calórica* (ITC).

El primero se debe a Belding y Hatch, quienes lo desarrollaron en la Universidad de Pittsburg en 1955. Se fundamenta en la relación existente entre la evaporación requerida y la evaporación máxima (ver ecuaciones 7.1 y 8) y el valor del índice se expresa en forma de porcentaje:

$$\begin{aligned} & (\text{Erq}/\text{Emx}) * 100 \text{ cuando } \text{Emax} \text{ es inferior a } 700 \text{ W y} \\ & (\text{Erq}/700) * 100 \text{ cuando es inferior a } 700 \text{ W.} \end{aligned}$$

La evaporación máxima admitida es de 700 W o 602 kcal/hora, equivalente a un grado de exudación de 17 g/min. Si el valor del índice es superior a 100 se produce un calentamiento del cuerpo por condensación del sudor en la piel; si es inferior a 0 se produce enfriamiento por evaporación.

En 1963 Givoni desarrolló un índice similar al que denominó *Índice de Tensión Calórica* (ITC), aunque en este caso considera como variable representativa del confort la relación entre la evaporación que realmente se produce (E_{rsw}) y la evaporación máxima (ecuaciones 7.1 y 8.1).

En la aplicación que de este índice realizaron para Tel Aviv Swaid et al. (1993), consideran situaciones confortables cuando la relación E_{rsw}/E_{mx} es igual o inferior a 0.12; valores superiores indican condiciones de disconfort y el organismo se ve sometido a tensión por estrés térmico tanto más acusada cuanto mayor es la desviación del índice respecto al umbral 0.12.

4.2.3. TEMPERATURA APARENTE DE STEADMAN

STEADMAN se planteó en 1984 establecer una escala de la temperatura aparente, válida para los diferentes climas de la tierra y en diferentes situaciones. Tras un prolijo análisis de todos los supuestos y variables utilizadas, suministra una serie de ecuaciones que permiten evaluar la temperatura equivalente en situaciones diferentes, a partir de un número reducido de variables meteorológicas.

Los parámetros de partida son:

- personas adultas, caminando a 1.4 m/s, con una generación de calor interno equivalente a 177.8 W/m².
- resistencia térmica de la ropa equivalente a 1/8

- presión del vapor equivalente a una Hr del 80%,
- viento de referencia 2.7 m/s.

Los resultados son los siguientes:

condiciones	ecuación	desviación standard residual (°K)
Interior	$-1.3 + 0.92T_a + 2.2 P_a$	0.32
Exterior a la sombra	$-2.7 + 1.04T_a + 2.0P_a - 0.65V_{10}$	0.44
exterior al sol	$4.5 + 1.02T_a - 1.0V_{10}$	0.54
incluyendo Radiación (Qg)	$1.8 + 1.07T_a + 2.4P_a - 0.92V_{10} + 0.044Q_g$	0.51

- T_a es la temperatura del aire en grados
- P_a la presión del vapor en kPa
- V_{10} la velocidad del viento medido en la garita, en m/s
- Q_g radiación neta exterior por unidad de área del cuerpo humano, en W/m².

Kalkstein (1982 y 1983) y Kalkstein y Valimon (1986), han adaptado los resultados de Steadman, a su clasificación de los tipos de tiempo con el fin de evaluar el impacto del clima en diferentes áreas climáticas.

4.3. MODELOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS DIFERENTES ÍNDICES

El gran número de variables que intervienen en el balance de calor y la complejidad de cálculo requerido para los diversos índices, ha dado lugar a la aparición de modelos matemáticos que facilitan todos estos procesos. A título de ejemplo exponemos algunos de los que consideramos pueden ser de mayor utilidad en nuestros estudios

4.3.1. MEMI: MUNICH ENERGY BALANCE MODEL FOR INDIVIDUALS (MEMI)

Tiene como objetivo determinar la temperatura fisiológica equivalente (TFE) o «Physiologically Equivalent Temperature» (PET), a partir de la modelización de las condiciones térmicas del cuerpo humano

La Temperatura Equivalente Fisiológica, se define como la temperatura que en cualquier lugar, interior o exterior, representa un valor equivalente al balance producido en un espacio interior, para un individuo en actividad liviana (80 W), ropa ligera (Cl 0.9) y temperaturas de la piel y el cuerpo similares a las observadas en las condiciones reales. Así, una PET de 43 °C obtenida para un día cálido y soleado, indica que el ocupante de una sala con

una temperatura del aire de 43 °C, alcanzaría el mismo estado térmico que en las condiciones externas. Si se desplazara el sujeto fuera de la irradiación solar directa, es decir a la sombra, el valor de PET descendería hasta 29 °C.

El modelo asume las siguientes condiciones en el espacio de referencia:

- $t_{mrt} = t_a$
- velocidad del aire de 0.1 m/s
- presión del vapor de agua de 12 hPa, equivalente a la humedad relativa de 50% con una $t_a = 20$ °C.

Algunos de los valores obtenidos en diferentes escenarios, aparecen en el cuadro siguiente (Höppe, P. 1999):

	Ta °C	Tmr °C	v m/s	Vp hPa	PET °C
habitación	21	21	0.1	12	21
invierno al sol	-5	40	0.5	2	10
invierno a la sombra	-5	-5	5	2	-13
verano al sol	30	60	1	21	43
verano a la sombra	30	30	1	21	29

4.3.2. MENEX MODEL: MAN ENVIRONMENT HEAT EXCHANGE DE BLAZEJCZYK

Se aplica a condiciones exteriores y permite evaluar el balance de calor y su adaptación a las fluctuaciones en cortos periodos de tiempo o en condiciones medias.

De los mismos autores es el modelo denominado BIOKLIMA que permite el cálculo de gran número de índices biometeorológicos y termofisiológicos. Ambos modelos se encuentran disponibles de forma gratuita en la red:

<http://www.igipz.pan.pl/klimat/blaz/menex.htm>

4.3.3. UBIKLIM: URBANES BIOKLIMA MODEL

Gratz y Jendritzky (1997 y 1998) han elaborado este modelo para su aplicación en espacios urbanos. Consta de cuatro módulos: el primero, calcula la temperatura, la humedad, el viento y la radiación al nivel de la calle, en función de las características de los materiales que componen el entramado urbano; en el segundo se obtiene la temperatura media radiante y los flujos de radiación de onda larga y corta al nivel de la calle; el tercero genera una zonificación climática y el cuarto es el mapa bioclimático definitivo en el que se representa el estrés térmico en los diferentes sectores urbanos.

APÉNDICES

I

GRADO METABÓLICO PARA DIFERENTES ACTIVIDADES (ASHRAE)

1 me = 58.2 W/m²

Niveles Metabólicos (M)	W/m ²	Met
REPOSO		
Durmiendo	41	0.7
Recostado	47	0.8
Sentado, quieto	58	1.0
En pié, relajado	70	1.2
ANDANDO (KM/H)		
3	119	2.0
4	142.8	2.5
4.8	155.4	2.7
5.6	191.8	3.3
6.4	228.2	3.9
8	347.2	6.0
OCUPACIONES DIVERSAS		
Actividad ligera, sentado	69.6	1.2
Actividad ligera, de pié	92.8	1.6
Actividad media, de pié	116	2.0
Actividad pesada	174	3.0
LABORES DOMÉSTICAS		
Limpieza de la casa	116.4 a 197.9	2 a 3.4
Cocinando	93.1 a 116.4	1.6 a 2
Planchando	116.4 a 209.5	2 a 3.6
ACTIVIDADES DE OCIO		
Pesca	69.8 a 116.4	1.2 a 2
Bailes sociales	139.9 a 232.8	2.4 a 4.4
Tenis	209.5 a 267.7	3.6 a 4.6
Squash	291 a 419	5 a 7.2
Golf	81.5 a 151.3	1.4 a 2.6
Ejercicios de gimnasia	174.6 a 232.8	3 a 4
Baloncesto	291 a 442.3	5 a 7.6

II
UNIDADES CLO PARA ARTÍCULOS INDIVIDUALES DE LA ROPA.
VALORES DETERMINADOS EN LA UNIVERSIDAD DE KANSAS, UTILIZANDO UN MANIQUÍ
ESTÁTICO DE COBRE. (ASHRAE) 1 CLO = 0.155 M²°C/W

Prendas de vestir (Icli)	Clo	m ² °C/W
ROPA INTERIOR INFERIOR		
Panty	0.03	0.005
Bragas y calzoncillos	0.04	0.006
Calzoncillo 1/2 pierna de lana	0.06	0.009
Calzoncillo pierna entera	0.10	0.016
ROPA INTERIOR SUPERIOR		
Sujetador	0.01	0.002
Camiseta sin mangas	0.06	0.009
Camiseta manga corta	0.09	0.014
Camiseta manga larga	0.12	0.019
Camiseta térmica nylon	0.14	0.022
CAMISAS		
Camisa manga corta	0.09	0.029
Blusa ligera, manga larga	0.15	0.023
Camisa ligera, manga larga	0.20	0.031
Camisa normal, manga larga	0.25	0.039
Camisa franela, manga larga	0.30	0.047
Blusa larga de cuello de cisne	0.34	0.053
PANTALONES		
Pantalones cortos	0.06	0.009
Pantalones cortos de excursión	0.11	0.017
Pantalones ligeros	0.20	0.031
Pantalones normales	0.25	0.039
Pantalones de franela	0.28	0.043
Pantalones de chandal	0.28	0.043
SUÉTER		
Chaleco	0.12	0.019
Suéter fino	0.20	0.031
Suéter normal	0.28	0.043
Suéter grueso	0.35	0.054
CHAQUETA		
De vestido	0.13	0.020
Chaqueta ligera de verano	0.25	0.039
Chaqueta de entretiempo	0.35	0.054
ABRIGOS		
Abrigo	0.60	0.093
Gabardina	0.55	0.085
Anorak	0.30	0.047

CALZADO		
Calcetines	0.02	0.003
Calcetines gruesos tobillos	0.05	0.008
Calcetines gruesos largos	0.10	0.016
Zapatilla, rellena de peluche	0.03	0.005
Zapato suela fina	0.02	0.003
Zapato suela gruesa	0.04	0.006
Botas	0.10	0.016
GUANTES		0.05 0.008
FALDA, VESTIDO		
Falda ligera, 15 cm sobre rodilla	0.10	0.016
Falda ligera, 15 cm bajo rodilla	0.18	0.028
Falda gruesa hasta la rodilla	0.25	0.039
Vestido ligero sin mangas	0.25	0.039
Vestido de invierno manga larga	0.40	0.062

III

RESUMEN DE LAS VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL CÁLCULO DEL BALANCE DE CALOR ENTRE EL CUERPO Y EL ENTORNO

A.- AMBIENTALES

A.1.- TEMPERATURA

- ta: temperatura del aire, medida con el termómetro seco, en °C.
- t_{mr}: temperatura media radiante. Puede ser medida con el termómetro de globo o calculada a partir de:
 - Radiación incidente
 - Tipo de materiales
 - Orientación y anchura de las calles

A.2.- VIENTO: VELOCIDAD EN M/SEG.

- Viento efectivo: Puesto que el viento medido corresponde a la garita situada a 10 metros del suelo, algunos autores proponen algunas transformaciones para evaluar el viento que realmente se produce al nivel de la calle o viento efectivo. Así STEADMAN (1978) propuso las siguientes:

$$V_{ef} = 0.527V_{10}, \text{ para una persona quieta y}$$

$$V_{ef} = (0.53*V_{10})^2 + 1.4^2 - (2*0.53*V_{10}*1.4), \text{ para una persona andando a 1.4 m/s.}$$

V_{10} es la velocidad del viento medido en la garita.

A.3.- HUMEDAD

- HR: Humedad relativa del aire, expresada en fracción decimal;
- PVA Y PVSK: La presión parcial del vapor y
- PSA Y PSSK: La presión del vapor saturante.

Ambas se calculan para la temperatura de la piel y la del aire.

Se expresan en kPA, pero algunas aplicaciones utilizan estos valores en hPA o mm de mercurio.

A.4.- RADIACIÓN:

Calculada a partir de factores astronómicos (altura y posición del sol) y superficiales (orientación y pendiente).

B.- FISIOLÓGICAS

B.1.- PRODUCCIÓN METABÓLICA O CALOR METABÓLICO M:

- M: producción de calor metabólico. Se expresa en W/m² o en met
1 met = 58.2 W/m² o 50 kcal/m²/h.

B.2.- ÁREA DE LA SUPERFICIE DEL CUERPO.

Calculada por la fórmula de Dubois:

$$Ad = 0.202 w^{0.425} h^{0.725}$$

Ad: área de la superficie en m²

w: masa en kg

h: altura en metros.

Los términos del balance se expresan por unidad de área de la superficie de Dubois temperaturas del cuerpo y de la piel

B.3.- TEMPERATURAS.

- temperatura interna del cuerpo.
- tsk: temperatura de la piel, en °C. Depende de la temperatura del aire, de la actividad y de la ropa. (Véase ecuación 2.2).

B.4.- HUMEDAD DE LA PIEL.

– w: representa la superficie de la piel cubierta por sudor. Su valor oscila entre 1 y 0 y depende de la temperatura de la piel. Los valores aparecen en el apéndice IV. También pueden ser calculados (Blazejczyk):

$$w = 1/(37.5 - t_{sk}) - 0.065$$

para $t_{sk} < 36.5^{\circ}\text{C}$ si $t_{sk} > 36.5^{\circ}\text{C}$ $w = 1$

C.- PARÁMETROS RELACIONADOS CON LA ROPA

- CLO, unidad básica de aislamiento de la ropa: $1 \text{ clo} = 0.155 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$.
- ICLI: aislamiento de prendas individuales (ver apéndice 2)
- Icl: aislamiento del conjunto de prendas que componen la vestimenta de un individuo, expresado en *clo*. (Ecuación 2.1).

4. - fcl: coeficiente que mide la relación entre el área cubierta por la ropa y el área desnuda. (Ecuación 2.4)

5. - fpcl: factor de permeabilidad de la ropa. (Ecuación 7.2)

D.- COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA.

– HC: coeficiente de transferencia de calor por convección. Depende de la diferencia de temperatura entre la superficie de la ropa y la del aire y de la velocidad del viento, cuando esta es mayor de 0.1 m/s. $\text{W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. (Ecuaciones 3.1 y 3.2).

– HR: coeficiente de transferencia de calor por radiación. El valor más corrientemente utilizado es $0.95 \cdot 4.7$. En W/m^2 .

– RELACIÓN DE LEWIS: relación entre los coeficientes de pérdida de calor por evaporación y convección. Su valor es 16.7.

– EFICACIA DE LA EVAPORACIÓN (η): indica la cantidad de sudor que se evapora en función de la superficie mojada de la piel (w). 8.1).

IV

VALORES DE ALGUNOS DE LOS PARÁMETROS MÁS UTILIZADOS EN EL BALANCE, SEGÚN EL TIPO DE ACTIVIDAD (ASRHAÉ)

Actividad	tsk (en $^{\circ}\text{C}$)	Icl /en clo)	hc ($\text{W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}$)	w
1 met	34.0 a 36.5	0.6	2.9	0.06
2 met	33.5 a 36.8	0.4	5.0	0.14
3 met	33.0 a 37.0	0.3	8.0	0.72

BIBLIOGRAFÍA

- ALONSO, J. MUÑOZ, J. ET ALT. (1985): «Clima y confort climático en la región central (Castilla la Mancha y Madrid» en *Paralelo 37*, 8-9, pp. 33-58.
- ÁLVAREZ y COLS. (1992): *Control climático en espacios abiertos*. Madrid, U. de Sevilla, Junta de Andalucía - CIEMAT, 195 pp.
- ARROYO ILERA, F. y FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1991): *El confort térmico en Madrid*. Ediciones de la Universidad Autónoma. 112 pp. (col F. Arroyo). ISBN: 84-7477-367-9
- ASHRAE (1993): *Handbook Fundamentals*. Atlanta, American Society of Heating and Air conditioning Engineers. Atlanta.
- AUDURIER-CROS, A. y IZARD, J.L. (1980): «Types de temps en climat méditerranéenne français et conception architecturale bioclimatique» en *Méditerranée*, 4, pp. 67-79.
- AULICIEMS, A. AND DEAR, R. (1998): «Thermal adaptation and variable indoor climate control» en *Advances in Bioclimatology. Human Bioclimatology*. Berlín, Springer, pp. 61-86.
- BESANÇENOT, J. P. (1987): *Les bioclimats humains en façade méditerranéenne de l'Europe. Etude géographique des effets physiologiques, psychiques et pathologiques d'une ambiance climatique sur les hommes*. Dijon, Centre de Recherches de Climatologie. 750 pp. 2vols.
- BESANÇENOT, J. P. (1990): *Climat et tourisme*. París, Masson, 224 pp.
- BLAZEJCZYK, K. (1994): «New climatological and physiological model of the human heat balance outdoor (MENEX) and its applications in bioclimatological studies in different scales» en *Blazejczyk and Krawczyk (ed) Bioclimatic research of the human heat balance*. Zeszyty IGIPZ PAN, 28, 2.
- BLAZEJCZYK, K. AND M. (1996): *Bioklima, un nouvel outil de la recherche bioclimatique*. Publications de la AIC, 11, pp. 173-177.
- CALVO PALACIOS, J.L. (1976): «Aportaciones metodológicas al estudio geográfico del microclima urbano» en *Boletín de la real Sociedad Geográfica*, pp. 95-109.
- DAUPHINE, A. y EDELGA, G. (1971): «Les quartiers climatiques a Nice». *Cahiers de l'Association française de Biométéorologie*, V, n. 4, pp. 13-30.
- DOMÍNGUEZ BASCÓN, P. (1999): *Clima, medio ambiente y urbanismo en Córdoba*. Córdoba, Col. Estudios Cordobeses, 344 pp.

- CANET, J. E. (2000). *Confort climático en castellón, Valencia y Alicante*. Memoria de Licenciatura dirigida por P. CUEVA. Dto. Geografía, U. de Valencia, 192 pp.
- CANET, J. E y PÉREZ CUEVA, A. (1998): «Confort climático en Valencia» en F. Fernández et alt. (coord): *Clima y ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*. Madrid, Parteluz, pp. 343-356.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1994): «Clima y confortabilidad humana. Aspectos metodológicos». *Revista de la Universidad de Alcalá de Henares, Serie geográfica*, 4, pp. 109-125.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (1995): *Manual de Climatología Aplicada. Clima, Medio Ambiente y planificación*. Madrid, Síntesis, 216 pp.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2001a). «Clima y calidad ambiental en las ciudades: propuesta metodológica y aplicación al área de Madrid», en *Proyectos y métodos actuales en climatología* (Raso, J. M y M. Vide, J. eds.). Barcelona, Publicación de la Asociación Española de Climatología (AEC), Serie B, nº 1, pp. 41-66.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2001b): «Clima urbano y confort térmico en Madrid, España». *III Congresso Brasileiro de Biometeorologia*. Maringá (Brasil), octubre 2001.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2001c): «El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico». *Boletín de la Real Sociedad Geográfica* (en prensa).
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2001-2002): El clima urbano de Madrid y su influencia sobre el confort térmico. *Boletín de la Real Sociedad Geográfica*, CXXXVII-CXXXVIII, pp. 169-185.
- FERNÁNDEZ GARCÍA, F. (2002): Propuesta de un índice de confort relativo diario para determinar los extremos térmicos en la España peninsular. *Estudios Geográficos*, LXIII, 248-249, pp. 301-318.
- FUKUOKA, Y. (1997): «Biometeorological studies on urban climate». *International J, of Biometeorology*, 40, pp. 54-57.
- GIVONI, B. (1976): *Man, climate and architecture*. Londres, Applied Science Publishers, 483 pp.
- GRATZ, A. AND JENDRITZKY, G. (1995): «Preliminary climatic study of the Karlsruhe area: part I UBIKLIM, a tool for climatologically related planning in urban environment». *Klimaanalyse fuer die Stadtplanung*, pp. 143-148.

- HÖPPE, P. (1999): «An universal index for the assesement of the thermal environment. The physiological equivalent temperature P_{et} », en *Proceedings of the 15 International Congress of Biometeorology & International conference on urban climatology*. Sydney, (ICB9.1).
- JÁUREGUI, E. CERVANTES, J Y TEJEDA, A. (1997): "Bioclimatic conditions in Mexico city- an assessment". *Int. J. Biometeorology*, nº40, pp. 166-177.
- JENDRITZKY, G. AND GRÄTZ, A. (1997): «Human bioclimatological questions and solutions in applied urban climatology». *Klimaanalyse fuer die Stadplanung*, pp. 147-155.
- JENDRITZKY, G. AND GRÄTZ, A. (1998): «Mapping Human bioclimates in various scales with particular reference to urban desing», in preprints of the *13 Conference of Biometeorology*, in Albuquerque, AMS: 168-171.
- KALKSTEIN, L. AND VALIMONT, K. (1986): "An evaluation of summer discomfort in the United States using a relative climatological indez". *Bull. American Meterological Society*, V. 67, nº 7, pp. 842-848.
- KALSTEIN, L.S. AND GREEN, J.S. (1997): «An evaluation of climate/mortalityrelationship in large U.S. cities and the possible impacts of Climate Change». *Environmental Health Perspectives*. 105, pp. 84-93.
- KVISGAARD, B. (1997): *Thermal confort*. Denmark, INNOVA Air Tech Instruments (Trad. Martin Monroy, M. 2000), 34 pp.
- MARCO, J. (1998): «Confort térmico» en *La energía solar en la edificación*. Madrid, CIEMAT, pp. 3.3-3.25.
- MATEOS CAÑIZAL, J. y RODRÍGUEZ PUEBLA, C. (1985): *Precisiones sobre el bienestar climático en el distrito académico de Salamanca*. Madrid, INM, 68 pp.
- OLGYAY, V. (1963): *Design with climate*. Princeton University Press, Traducido en 1998 con el título: *Arquitectura y clima*. Barcelona, Gustavo Gili, 203 pp.
- PICKUP, J. AND DEAR, R. (1999): «An outdoor thermal confort index. Part I; the model and its assumptions» en *Proceedings of the 15 International Congress of Biometeorology & International conference on urban climatology*. Sydney, (ICB9.4).
- PICKUP, J. AND DEAR, R. (1999): «An outdoor thermal confort index. Part II, applications» en *Proceedings of the 15 International Congress of Biometeorology & International conference on urban climatology*. Sydney, (ICB10.2).
- RAMÓN, F. (1980): *Ropa, sudor y arquitectura*. Madrid, Blume, 124 pp.

- STEADMAN, R.G. (1979): «The assesment of sultriness. Part I: A temperature-Humidity Index based on human physiology and clothing science». *Journal of Applied Meteorology*, 18, pp. 861-873.
- STEADMAN, R.G. (1979): «The assesment of sultriness. Part II: effects of wind, extra radiation and barometric presure on apparent temperature». *Journal of Applied Meteorology*, 18, pp. 874-885.
- STEADMAN, R.G. (1984): «A universal scale of apparent temperature». *Journal of Climate and Applied Meteorology*. 23, pp. 1674-1687.
- H. SWAID, M. AND M.E. HOFFMAN (1993): *A Bioclimatic desing for urban outdoor spaces. Theoretical and Applied Climatology*, 48, pp. 49-61.
- UNGER, J. (1999): "Comparisons of urban and rural bioclimatological conditions in the case of a Central European city". *Int. J. Biometeorology*, nº 43, pp. 139-144.