

TERMODINAMICA DEL COLAPSO POR CALOR HUMEDO (HIPERTERMIA)

por: Julián Sánchez Rodríguez
Doctor en C. Físicas

TERMODINAMICA DE LA VIDA

La vida biológica, la actividad vital, origina entropía, inevitablemente. Fue Schrödinger (10), iniciador importante del moderno interés de los físicos por la Biología, quien señala cómo la alta durabilidad de la substancia hereditaria, evitando la tendencia al desorden, radica en la molécula-obra maestra de un orden altamente diferenciado, defendido por la varita mágica de la teoría cuántica. Ochoa, y otros biólogos en su línea, están desvelando el carácter de estas moléculas asimétricas, estables, fundamentalmente actuantes en los genes transmisores de los caracteres individuales y de cada especie. Ciertamente que la Mecánica cuántica da la solución que explica la salvaguardia del determinismo de la especie frente al indeterminismo inicialmente achacable al pequeño tamaño de los microorganismos que son los genes. Pero ahora quiero dedicar la atención a ese otro determinismo que resulta de las colectividades estadísticas, no ya de los pocos millares de átomos de los genes, sino las de los organismos superiores. Las leyes termodinámicas, estadísticas, son perfectamente aplicables. Según éstas, un sistema aislado evolucionaría hacia un estado de entropía máxima. Ahora bien, los seres vivos no están aislados, sino en un medio ambiente. (Un pensador español, Ortega y Gasset basó su filosofía en el hombre y su circunstancia.) No es cierta la afirmación del biólogo Bernard de que los animales superiores, los de sangre caliente, medio interno regulador de su isotermita, están independizados del medio ambiente. No existe el adiabatismo y están obligados a compensar las pérdidas de energía libre que sufren en su actividad vital. La generación de entropía

(en griego significa desorden, vergüenza) hace disminuir la energía utilizable (según Darrieus), esto es $\Delta (U + p_0V - T_0s)$, con el siguiente significado de los símbolos: U, energía interna; p_0 y T_0 , presión y temperatura ambiente; V, volumen del sistema o colectividad; s, entropía del mismo.

Para lograr la eliminación del aumento de entropía que en el curso de su vida se produce en el ser vivo, éste habrá de expulsar calor. $T_0 \cdot \Delta s$ será el correspondiente término en la expresión de la energía utilizable. La eliminación del calor será posible si la temperatura del ser humano, si la temperatura del ser vivo, es superior a la ambiental. También no es menos cierto que para conservarse el estado estacionario del ser vivo, necesita absorber energía. Con estas ideas vamos esquematizando el comportamiento termodinámico del ser vivo. Palacios (5) enfatiza cómo esta reordenación del ser vivo, y la producción de trabajo en su actividad, aquí importa el principio de la equivalencia, precisa incorporar energía en la forma potencial de alimentos, y expulsar parte de ella en forma de calor, incluso aún en el caso de los animales de sangre fría, si bien aquí en menor escala, y, también, en el proceso de incubación de las aves y reptiles. Algunos peces, como determinados tiburones y atunes, reconocidos como capaces de más importantes esfuerzos musculares que el resto de sus congéneres, sujetos más pasivos por su casi obligada isotermita en el agua de tan gran capacidad calorífica, lo son gracias a dispositivos especiales de sangre caliente con temperaturas, en tales redes o dispositivos, diez grados mayores que la exterior, según demostraron Carey, Scholander (10) y otros, resaltando el papel de cambiadores de calor de lo que se llama "mirabile rete", paquete-

tes de venas y arterias perfectamente organizados, a la vez que les permite disponer de suficiente proporción de oxígeno para sus músculos calentados y, por tanto, de mejor rendimiento.

La disponibilidad de energía la consiguen los seres vivos, fundamentalmente, por metabolismo (su significado en griego es el de cambio o intercambio) de los alimentos, sistemas lábiles, de los que se puede librar por reacciones, digamos de putrefacción, más o menos catalíticas (enzimas, fermentos) la energía potencialmente acumulada en ellos.

Antes señalé que la degradación es incluso inevitable en el ser vivo en los períodos de reposo. La lucha contra ella, o sea por la reordenación, está encomendada a procesos biológicos interpretables termodinámicamente. En alguna parte del organismo, subsistema, se produce ordenación, disminución de entropía, con intervención de un "organizador". Son ejemplos las fotosíntesis y la síntesis de proteínas a partir de aminoácidos. En un artículo de Steve P. Heims (2) se analizan interesantes facetas de esta interpretación termodinámica, encontrando analogías con el efecto Overhauser en que la polarización dinámica hace que núcleos alcancen improbables altos niveles de energía.

REGULACION TERMICA HUMANA

El hombre, como los animales mamíferos, ejerce durante su vida un importante despliegue de independencia térmica. Mantener una temperatura constante de contorno, en condiciones ambientales muy diversas y con una generación de calor interno (interpretable termodinámicamente como fuente) muy variable, requiere un margen muy amplio de regulación y nos mueve admirativamente hacia la capacidad de adaptación de la Naturaleza, de la Vida, al compararla con la de los sistemas de regulación industrial.

Por supuesto que la complejidad es mayor en cuanto se considera que la fuente interna está constituida por distintos órganos en régimen de

producción calorífica diferente, muy variable además según el instante y según la demanda de actividad de cada uno de ellos. En el organismo de regulación humano, como en los de regulación de un proceso o una máquina industriales, en que ciertamente imitamos a la Naturaleza, la temperatura variable de la piel humana puede diferir ocasionalmente de la de referencia, digamos 33 °C (306 K) pero estas diferencias a compensar en la frontera cuerpo humano-ambiente, que es la piel, no serán importantes, y no generales, a menos que el mecanismo de regulación esté actuando insuficientemente. No menos trascendencia tiene la consideración de que una carga calorífica interna variable ha de ser también disipada por la piel. Se comprende la lógica operativa de una temperatura constante del cuerpo individual, ya que estando constituido por órganos con misiones funcionales diversas, el funcionamiento conjunto exigirá un equilibrio muy delicado, dentro de una tolerancia fluctuante más bien pequeña. Unos coeficientes térmicos seguramente algo diferentes, para los distintos órganos, hace increíble la existencia de varias bandas o temperaturas de equilibrio en situaciones casi normales. Creo que la extensión de mecanismos y la extrapolación de respuestas en situaciones extraordinarias puede ser equivalente de hecho a alguna otra temperatura de equilibrio durante períodos de tiempo no excesivos. En la hibernación puede haber algo de esto, aparte de la reducción del metabolismo de sostenimiento.

Recordamos, pues, que la biología fisiológica corrige las variables controladas o vigiladas, en expresión dentro de nuestro lenguaje interpretativo de los fenómenos según las variables físico-químico-biológicas, en su papel de variables reguladas o reguladoras. Varias comprobaciones demuestran que la temperatura del cuerpo humano tampoco es rigurosamente uniforme, ni es constante en el tiempo. Por ejemplo, comprobé hace ya tiempo que el sueño va asociado con una caída de la temperatura humana, siendo precedido el despertar natural por nueva alza térmica hasta alcanzar la temperatura habitual, pero es que en un reposo de duración normal no hay una sola onda térmica, sino hasta dos o tres, cada una de 2,5 ó 3 horas de duración, explicando además que, con-

pletado un número "exacto" de períodos térmicos de sueño, juzgado como inactividad relativa, nos despertemos en régimen de optimismo psíquico.

Dejada aparte la pequeña variabilidad ocasional o típica, aceptamos como dato general de temperatura del cuerpo humano el de 37 °C y reconocemos que el bienestar y la supervivencia depende de la capacidad de mantener la temperatura próxima a ese valor normal que difiere muy poco entre individuos y dentro de circunstancias normales.

Cualquier órgano pone en juego en su funcionamiento complejas cadenas de reacciones de distinto sentido en busca de equilibrio mediante la interacción con las desarrolladas en otros órganos. Fundamentalmente, la temperatura ha de considerarse como un parámetro vital y sabemos que en las reacciones físico-químico-biológicas, asume siempre el papel de factor determinante en la explicación científica de las mismas. La temperatura como determinante primordial del rendimiento de cada reacción logra en el conjunto de todas las encadenadas que se desarrollan incluso en diferentes órganos fisiológicos un delicado acomodo a la situación ambiental o vital en que el individuo está comprometido. Leyes como las de Vant'Hoff y Kirchoff avalan el difícil contrapunto de la teoría del equilibrio pero no lo dicen todo. No menor trascendencia tiene la interpretación del mundo fisiológico a través del concepto físico de las variaciones entrópicas en la "máquina corporal".

Una simplista consideración de un cambiador de calor entre la temperatura de 37 °C (310 K) de los órganos humanos y la de 33 °C (306 K) de la piel, concebido como una máquina ideal de Carnot entre dos focos uniformes, asigna un rendimiento de $(T_1 - T_2) / T_1 = 4 / 306 = 0,013$.

Por otra parte cuando la temperatura ambiental es inferior a los 33° de la piel podrá transmitirse al exterior el calor humano interno, llegado a la zona subcutánea, mediante conducción y convección. Un poco más adelante estudiaré estos términos con algo de detalle. Ahora sólo señalaremos con alguna generalidad que desde 33° hasta unos 20 ó 18° como temperatura de nuestro entorno preva-

lecerá la disipación del calor humano. A temperaturas inferiores, si bien con multitud de factores correctores, según el grado de actividad, su duración, la costumbre, vestimenta, etc., el comportamiento térmico del cuerpo humano tenderá a retener calor o incluso a generar en calefacción personal el calor que nos asegure esos 33° característicos.

Por el contrario, para temperatura superior a los 33° de la piel, en el ambiente, aparece la imposibilidad de la transferencia de calor de la piel al ambiente y el riesgo de gradual elevación momentánea, al menos, de la temperatura de la piel por encima de los 33°, en parte por la ineludible llegada del calor interno asociado al funcionamiento orgánico como por la conducción o convección de calor desde el aire caliente a la piel, o por la radiación de objetos exteriores calientes. Por conducción desde el aire apenas habrá aportación dada la baja conductividad del aire.

La dificultad de la disipación calorífica, para temperaturas superiores en el ambiente a 33°, quedará superada por la evaporación de un líquido en la superficie cutánea. Esta es la interpretación termodinámica del proceso fisiológico de la transpiración o presencia en la piel del sudor, que, prácticamente es agua. La existencia de sales en ese agua dan al sudor el carácter de una solución y, por tanto, la propiedad de tonicidad que necesita para participar en el juego de paso o retención de líquidos orgánicos a través de las membranas celulares y orgánicas, que podemos interpretar como válvulas de bicirculación en uno u otro sentido según interese al proceso realizado.

Físicamente, el proceso de regulación térmica del cuerpo humano está enriquecido así con un parámetro activo más. Para nuestra interpretación podemos utilizar cualquiera que sea descriptivo de la existencia de vapor en el aire "húmedo" ambiental. Resultará una facilidad complementaria de regulación térmica humana a favor de ambientes secos, ya que la mayor posibilidad de evaporación en estos, permitirá, en su caso, más intensas disipaciones de calor. Al contrario, si la humedad ambiental es alta, las dificultades de evaporación del

sudor transpirado en intento de contribución a la regulación térmica constituirán un factor de incomodidad o “discomfort” que tumectará la piel humedecida inútilmente, añadiendo nueva causa de “stress”. Hay que anotar que la producción de sudor ocurre como respuesta a la elevación de temperatura de la piel (tenemos calor). Parece que no disponemos de señal inhibitoria demasiado ajustada, como debiera ser frente a la dificultad de evaporar en ambiente de alto porcentaje de humedad. Prevalece la sensación de emergencia ante la gradual agravación de la situación y la temperatura en alza, denunciada por la de la piel, de los órganos delicados, comienza a ser prelude de daños irreversibles.

La mayor humedad hace más crítica la regulación térmica en los ambientes tropicales (selva húmeda). También en los artificiales, como los baños termales con vapores cálidos, que de siempre van ligados a culturas avanzadas, desde las clásicas griega y romana y aún anteriores. Tampoco podemos olvidar las situaciones difíciles que se plantean aun en ambientes de menor humedad cuando llega al individuo radiación térmica importante. Es el caso que sufren los segadores. Debemos admirar la inteligente protección que utilizan y que les permite protegerse cuando se inclinan sobre la tierra ardiente en recolección de sus cosechas. El drama de la sequía, que se acepta incluso como estacional en el “verano mediterráneo” resulta ser un factor favorable a ese campesino cuando recoge el fruto estival de sus tierras.

EL CALOR HUMANO EN CIFRAS

El metabolismo, la actividad fisiológica y la física o mecánica suponen fuentes de calor. Repasaremos la cuantía de esos valores energéticos. En reposo y a 37 °C tenemos la equivalencia calorífica del metabolismo humano: 75 vatios, o si se prefiere, 313,5 calorías gramo cada segundo de descanso en isoterminia entre cuerpo humano y ambiente. 75 vatios es el metabolismo basal.

Cuando se realiza trabajo físico, sólo resulta en trabajo un 20 % de la energía química utilizada.

Aún así y todo se trata de un resultado estupendo, bastando comparar con el 1,3 % de una máquina ideal entre 37 y 33 °C. Hay, pues, un 80 % restante de aquella energía potencial de los alimentos que va a parar a energía calorífica, en los músculos que trabajan y por el resto del cuerpo, con la subsiguiente elevación de temperatura hasta tanto se elimina ese calor complementario. Correlativa con la elevación de temperatura aumenta el metabolismo en la proporción de 4 a 13 % por cada grado de aumento térmico, lo que contribuye a incrementar progresivamente el crecimiento de temperatura asociado con un trabajo intenso y prolongado.

Estimemos el aumento de temperatura en condiciones adiabáticas en una persona típica de peso 75 kg. la incorporación de 75 vatios (metabolismo puramente basal) 300 vatios (actividad moderada) y 1.000 vatios (corredor olímpico con fuerte Sol) dan elevaciones adiabáticas de temperatura de 1, 4 y 13 grados, respectivamente (1).

El mínimo de pérdida de calor para una persona desnuda ocurre a unos 30 °C. Para temperaturas inferiores la convección y la radiación son los principales mecanismos de pérdida de calor vital.

CONVECCION

La transmisión calorífica, k, por una superficie entre dos medios (véase cualquier Termodinámica, por ejemplo (8)), responde a:

$$\frac{1}{K} = \frac{e_p}{\lambda_p} + \frac{1}{\alpha_c} + \frac{e_a}{\lambda_a} \approx \frac{1}{\alpha_c}$$

aplicada a nuestro tema: λ_p , conductividad de los tejidos subcutáneos; λ_a , la del aire; e_p y e_a , respectivamente, los espesores de conducción de esos tejidos y del aire, α_c la convectividad desde la piel al aire. Fundamentalmente k tendrá el orden de valor que le proporcione la menor de las fracciones del segundo miembro, aquí, $1/\alpha_c$. De modo que frente a la conductividad destaca el papel de la convectividad. La potencial disipación de calor por unidad de superficie

$$q_c = (t_p - t_a) \alpha_c$$

dependerá de la diferencia de temperatura entre la piel y el aire, y del coeficiente de convectividad α_c que a su vez es función de la orientación de la superficie y de la velocidad del aire, por lo menos netamente para orientación vertical de la superficie. Está clara la concordancia de conceptos actividad-posición vertical, para los humanos. El agricultor, en múltiples faenas manuales, ha de tener, sin embargo, su espalda horizontal, casi en ángulo recto con sus piernas. La horizontalidad de gran parte de su cuerpo supone una convectividad por superficie no vertical y, por tanto, más débil, además del contratiempo que significa la recepción radiante procedente del terreno en tiempo cálido y hacia la tierra en tiempo frío. Matizaciones, diríamos, que explican mejor la dureza del trabajo agrícola sin máquinas. La transmisión convectiva será favorecida por el aumento de la velocidad y por la posición vertical. Comprendemos por qué se bracea al tiempo de la marcha y del paseo.

Para el estudio de α_c utilizo una ecuación dimensional (7) del tipo:

$$Nu = \text{Const} (Gr \cdot Pr)^n$$

válida para aire en calma. Con valores al menos orientativos coeficiente o constante igual a 0,55 para superficie vertical y más pequeño para superficie horizontal, con $n = 0,25$, para valores del paréntesis entre 10^4 y $3,5 \cdot 10^7$. Para valores del paréntesis entre $3,5 \cdot 10^7$ y 10^{12} , el coeficiente es del orden de 0,13 y n igual a $1/3$. Los adimensionales incluidos en la anterior ecuación pueden formarse con los parámetros que a continuación señalo:

Número de Nusselt $Nu = \alpha l / \lambda_a$. Empleándose: λ_a , conductividad del aire igual a $0,02 \text{ Kcal/h m } ^\circ\text{C}$; l , longitud vertical de una persona del orden de 2 metros.

Número de Grasshof $Gr = l^3 \rho^2 g \beta \Delta t / \mu^2$. Para evaluación primaria utilizo los valores siguientes: ρ , densidad del aire, $1,3 \text{ kg m}^{-3}$; g , aceleración de la gravedad, $9,8 \text{ m s}^{-2}$; β , coeficiente de dilatación, $0,0366 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; Δt igual a la diferencia de temperaturas entre la piel y el aire que característicamente representen el salto térmico en cada caso; μ , viscosidad dinámica del aire, $0,0616 \text{ kg/m h}$.

Número de Prandtl $Pr = c_p \mu_a / \lambda_a$ para el que tomo el valor 0,7. De modo que:

$$Gr \cdot Pr \approx 1278 \Delta t \cdot 0,7 = 895 (t_p - t_a)$$

Luego para consideración global de superficie vertical:

$$Nu = \alpha_c l / \lambda_a = 0,55 \cdot 895^{1/4} (t_p - t_a)^{1/4} = 2,73 (t_p - t_a)^{1/4}$$

Y aproximadamente para el valor medio de α_c

$$\alpha_c \approx 2,73 \lambda_a (t_p - t_a)^{1/4} = 0,0557 (t_p - t_a)^{1/4}$$

Una diferencia entre piel y aire de $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ supone un coeficiente de convectividad de $0,08 \text{ Kcal/h m}^2$, que es un valor ciertamente bajo, pues da $0,4 \text{ Kcal/h}$ para la disipación calorífica. En contraste indagemos el coeficiente de convectividad para aire con velocidad v , para lo cual utilizo una fórmula de convección forzada

$$\alpha_c = 0,02 (Re^2 \cdot Pr)^{0,4}$$

Con el número de Reynolds $Re = \rho l v / \mu = 1,3 v / 0,0616 = 21,1 v$, luego $\alpha_c = 0,2 v^{0,8}$ con v en m h^{-1} . Para una velocidad, por ejemplo de $0,27 \text{ m s}^{-1} = 1000 \text{ m h}^{-1}$ resulta $\alpha_c = 0,3 \text{ Kcal m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ y para una diferencia térmica de $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ ya es q_c igual a $1,5 \text{ Kcal m}^{-2}$. Compárese con la penuria de intercambio calorífico posible en régimen de convección natural, digamos con aire en calma.

RADIACION

Con la diferencia de temperaturas que habitualmente se van a presentar entre la piel y el exterior no se comete error importante sustituyendo la ecuación de radiación

$$q_r = 4,96 C \left[(T_p/100)^4 - (T_a/100)^4 \right]$$

por la de pura proporcionalidad con la diferencia de temperaturas

$$q_r \approx 4,96 C (t_p - t_a)$$

Incluso con una diferencia térmica de $20 \text{ } ^\circ\text{C}$ el error es pequeño. Con la incorporación de q_c a la convectiva q_c , totalizamos así

$$q = (\alpha_c + \alpha_r) (t_p - t_a)$$

Para comparar valores numéricos, acudimos simplícidamente a considerar el coeficiente de radiación como es entre cuerpos negros, $C = 1$, con lo que $\alpha_r = 4,96 \text{ Kcal } ^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$, que nos informa de la transcendencia que puede tener cuantitativamente la radiación como bien sabe quien ha de trabajar sobre el campo castellano, calcinado en Verano y helado en Invierno, y en que el ángulo sólido en que se recibe la irradiación o se irradia al terreno llano es casi de 2π estereorradianes.

MANTENIMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL CUERPO

A) Con temperatura ambiental baja

Requiere la generación de calor individual para subvenir a las pérdidas superiores a la producción básica de calor por metabolismo. Un balance completo ha de considerar como sumandos positivos además del calor por metabolismo básico, el asociado a la actividad física, el de un ambiente cálido (no es aquí este caso), alimentos calientes, radiación solar, etc., y como componentes negativos: las pérdidas por conducción, convección, radiación, respiración, excreción y evaporación. De ser iguales las sumas de energías caloríficas en uno y otro sentido, el cuerpo humano permanecerá isoterma. Cuando la temperatura del ambiente es baja, el cuerpo humano dispone de mecanismos de producción extraordinaria de calor: la piloerección (piel de carne de gallina) y el temblor, además de una reducción de pérdidas caloríficas mediante el descenso de la circulación periférica, o mejor subcutánea. Los pequeños músculos de la base de los capilares colocan a los cabellos o pelos en posición casi perpendicular a la piel de la zona correspondiente. En algunos mamíferos es notable el aumento de espesor de su envoltura pilosa, lo que supone un incrementado efecto aislante y la reducción de pérdidas de calor en ambiente frío. Con el temblor, los músculos realizan trabajo, constituyendo la energía calorífica, asociada por razón termodinámica a la producción de trabajo muscular, al aumento de temperatura del cuerpo.

B) Con temperatura ambiental alta

Los mecanismos de regulación termostática incluyen aumento de la circulación sanguínea periférica, transpiración y jadeo. El aumento del flujo sanguíneo periférico puede resultar por dilatación de las secciones de paso de la sangre, debajo de la piel y hasta por una moderada proliferación de capilares en la zona.

Particular relevancia presentan los anteriores mecanismos en algunos procesos febriles.

En cuanto a las intensidades de evaporación de agua en la transpiración humana, Knochel (3) da los siguientes valores: $1,3 \cdot 10^2$ gramos hora⁻¹ para régimen de reposo con prácticamente sólo metabolismo basal, equivalente, si no hubiera refrigeración, a una elevación de $1 \text{ }^\circ\text{C/hora}$; $5 \cdot 10^2$ g h⁻¹ para actividad moderada (elevación potencial sin refrigeración de unos $4 \text{ }^\circ\text{C h}^{-1}$) y $17 \cdot 10^2$ en competiciones deportivas o trabajos intensos.

Además de la edad, son numerosos los factores o agentes, entre ellos los infecciosos y las medicinas o drogas que alteran el ajuste del sistema termostático corporal.

Cuando la fiebre se inicia en el enfermo se anuncia por escalofríos y temblores. Cuando termina, la transpiración es la señal. En una concepción esquemática simplificada cabe decir que la fiebre o la medicina elevan la temperatura de referencia del sistema termostático humano con la que este intervendrá en el sentido de permitir una mayor temperatura del cuerpo aproximándola a la de referencia. Cuando la fiebre deja al enfermo, es como considerar que baja la temperatura de referencia y que el ajuste a la nueva se haga por ordenación de bajada de la temperatura del cuerpo mediante transpiración y otras reacciones de enfriamiento.

LIMITE DE AUTORREFRIGERACION CORPORAL

Si la temperatura ambiental no es alta resultará suficiente la refrigeración o eliminación del calor

mediante los tres mecanismos de transmisión calorífica: conducción, convección y radiación. Según va siendo más alta la temperatura ambiental aumenta también la transpiración por las glándulas sudoríparas. Con una temperatura ambiente de 34 °C la evaporación del sudor es de hecho el único mecanismo efectivo para la refrigeración personal. Obstáculo a esta evaporación en intensidad suficiente será una fuerte humedad ambiental. Y por supuesto que el líquido que gotea o el que es empapado en toallas, o tejidos en general, no puede producir enfriamiento. Hay lógicamente imposibilidad de refrigeración por el sudor cuando el individuo se queda sin líquido suficiente, es decir, sufre deshidratación tras un período anterior de secreción excesiva frente a la deficiente ingestión compensadora de líquidos o alimentos acuosos. Con los datos de transpiración que antes se citaron se comprende que una importante pérdida de líquido no repuesto lleva a una grave deshidratación, acusable en deportistas por la fuerte pérdida de peso tras una dura competición. Más anecdóticamente ha de señalarse que cabe facilitar el enfriamiento impregnando superficies descubiertas de la piel con líquidos volátiles como colonias, alcohol, etc., o hielo.

La insuficiente refrigeración, esto es la deficiente eliminación, o poco rápida, del calor humano lleva aparejada la elevación de la temperatura corporal. Si esta alcanza los 40,6 °C cesa el crecimiento celular. A 42° hay daño fisiológico irrecuperable del cerebro, riñones y otros órganos. Nos hallamos entonces en un límite de la supervivencia humana. Podemos decir que ésta depende de la capacidad del ser humano para mantener la temperatura muy próxima a 37 °C, lo cual está relacionado con la intensidad y duración de las perturbaciones del ambiente exterior y de los factores propios que dificulten la autorregulación.

Evidentemente, el efecto más neto de autorrefrigeración por evaporación del agua cutánea ocurrirá con humedad bajísima como es el caso del desierto. El otro extremo ambiental en este aspecto corresponde al que muy gráficamente calificaré de "selva húmeda", es decir, temperatura alta o muy alta pero, sobre todo, tremenda humedad,

próxima al 100 %, delatable incluso por los celajes de neblina en temperatura elevada, sofocante en el lenguaje observador del que está sometido a los desagradables ambientes con ambos factores coligados. Cabe que una persona mantenga la temperatura corporal normal en una atmósfera seca hasta 115, o aún 127 °C, para algunos individuos mejor preparados, pero sólo mientras es capaz de producir sudor suficiente, lo que supone ingerir agua suficiente y no utilizar prácticamente ropas. En contraste, con una humedad relativa próxima a la saturación, nadie puede aguantar más de unos minutos una temperatura de tan sólo 48°. Por supuesto que la temperatura tendrá el efecto refrigerante más efectivo en el seno de aire en movimiento. Sitúan la cota máxima de disipación calorífica por transpiración de sudor en torno a los 650 vatios, o sea, 155 calorías/segundo, el doble de la producción en actividad moderada.

Incluso a temperaturas ambientales bajas, en que no se requiere refrigeración, hay difusión lenta de agua por los estomas de la piel y que luego se evapora. Este flujo es definido como transpiración insensible y su cuantía es de 20 gramos cada hora, mientras que el agua perdida por respiración es la mitad de ese valor. Algunos mamíferos, como el perro, no disponen más que de este último procedimiento de los señalados para autorrefrigeración, el jadeo, de aquí que le veamos siempre con la boca abierta, tras cualquier ejercicio.

El colapso por calor sucede en situaciones de exceso de ejercicio en ambiente cálido, todavía incluso con importante transpiración, antes que de seguir esta y aquellas resultaría el agotamiento del agua y la imposibilidad material de presentación de agua en la superficie cutánea en la misión de evaporación protectora y precisamente cuando más lo necesita la persona sometida a sobreesfuerzo físico. La piel seca es uno de los más alarmantes síntomas del colapso por el calor y ha de valorarse como signo de máxima urgencia médica, pero advirtiendo que frecuentemente el accidente sucede antes de detectarse tal señal de peligro.

Como consecuencia de la deshidratación es menor el volumen de sangre y hay incremento de su

viscosidad. Por lo primero cae la tensión sanguínea, cuando en oposición el aumento de viscosidad exige mayor potencia en el mantenimiento de la circulación de la sangre. El aumento de los capilares subcutáneos sin lograr detener la subida de la temperatura de la sangre supone la señal de nueva dilatación de los capilares. Si la temperatura del cuerpo sube $0,5^{\circ}$ la salida cardíaca aumenta del 30 al 75 % con la consiguiente bajada de la presión sanguínea, reduciéndose, pues, el flujo de sangre de los órganos vitales, con las consecuencias de que en los músculos se producirá debilidad, en los intestinos, náuseas, y vómitos en los riñones, lo que llevará a deficiente filtración. Y, en particular, en el cerebro a la ofuscación mental y a la inconsciencia. El vértigo está asociado con déficit de 40 % en el flujo sanguíneo respecto al normal. Persistiendo estas circunstancias negativas aparecen los síntomas de fatiga y extenuamiento. El mismo corazón puede resultar privado de suficiente riego sanguíneo, al derivarse una importante cantidad de sangre a la circulación periférica y ello cuando es mayor la demanda operativa del corazón. En el cerebro, un déficit de un 40 % en el movimiento sanguíneo implicará la inconsciencia en pocos segundos: es el colapso o "martillazo" por el calor.

Con una pérdida por deshidratación del 56 % en el peso del cuerpo puede sobrevenir el colapso debido al ritmo acelerado del corazón que trata de superar con su ritmo el déficit de sangre impulsado. En un ambiente cálido y húmedo como el natural de la selva tropical o artificial como la sauna, el mecanismo de la evaporación apenas tiene viabilidad frente a la elevación de temperatura corporal.

CIRCULACION SUBCUTANEA

Complementando la información necesaria para comprender la última cuestión tratada, procedo a resumirla. Entre la temperatura del cuerpo humano y su piel hay una diferencia de unos 4°C . La disipación calorífica por conducción depende del gradiente térmico subcutáneo. Una expansión y dilatación de la red de los capilares sanguíneos próximos a la piel incrementa la disipación de ca-

lor. El enrojecimiento de la piel en estas condiciones es claramente visible. La elevación de temperatura de la piel aumenta el citado gradiente térmico subcutáneo, lo que junto con el mayor flujo circulatorio aumenta la disipación calorífica. El aumento del flujo sanguíneo alcanza cifras de hasta $15\text{ cm}^3/\text{min}$. por cada centésima de grado de aumento de la temperatura del cuerpo, o sea que una subida de 1°C supone una demanda extra para el corazón de 1,5 litros/min, respecto al valor normal habitual de 5 a 6 litros/minuto.

En la situación contraria del cuerpo frío deberá reducirse la pérdida calorífica. Los capilares sanguíneos subcutáneos disminuyen de diámetro con lo que la sangre caliente se mantiene a mayor profundidad reduciéndose la pérdida calorífica al hacerlo el gradiente térmico subcutáneo. La piel aparece más pálida.

INDICE DE RIESGO DE COLAPSO

He buscado finalmente un índice climático que nos dé idea de la idoneidad en las diferentes zonas geográficas españolas y según los meses de presentación del riesgo de colapso por calor húmedo (hipertermia). Además de estar convincentemente relacionado con la presentación de tales accidentes debería ser fácil de obtener mediante los valores climáticos resumidos.

Dibujé un gráfico psicrométrico para aire húmedo con datos adquiridos en las referencias (4), (6) y (9). La línea curva superior es la de saturación. Las otras curvas corresponden a menores porcentajes de humedad. Las ordenadas pueden numerarse en tensiones de vapor o en proporción de mezcla, con escala diferente según la presión total. La red de líneas casi paralelas graduadas en kcal/kg corresponden a las isentálpicas del aire húmedo. La otra red de líneas casi verticales, no paralelas, graduadas en grados corresponden a las isotermas. Para los datos resumidos de los observatorios he acudido a la Guía resumida del Instituto Nacional de Meteorología (12), que corresponde al trentenio 1901-30. He dibujado una línea como la AB del ejemplo de la figura en que A co-

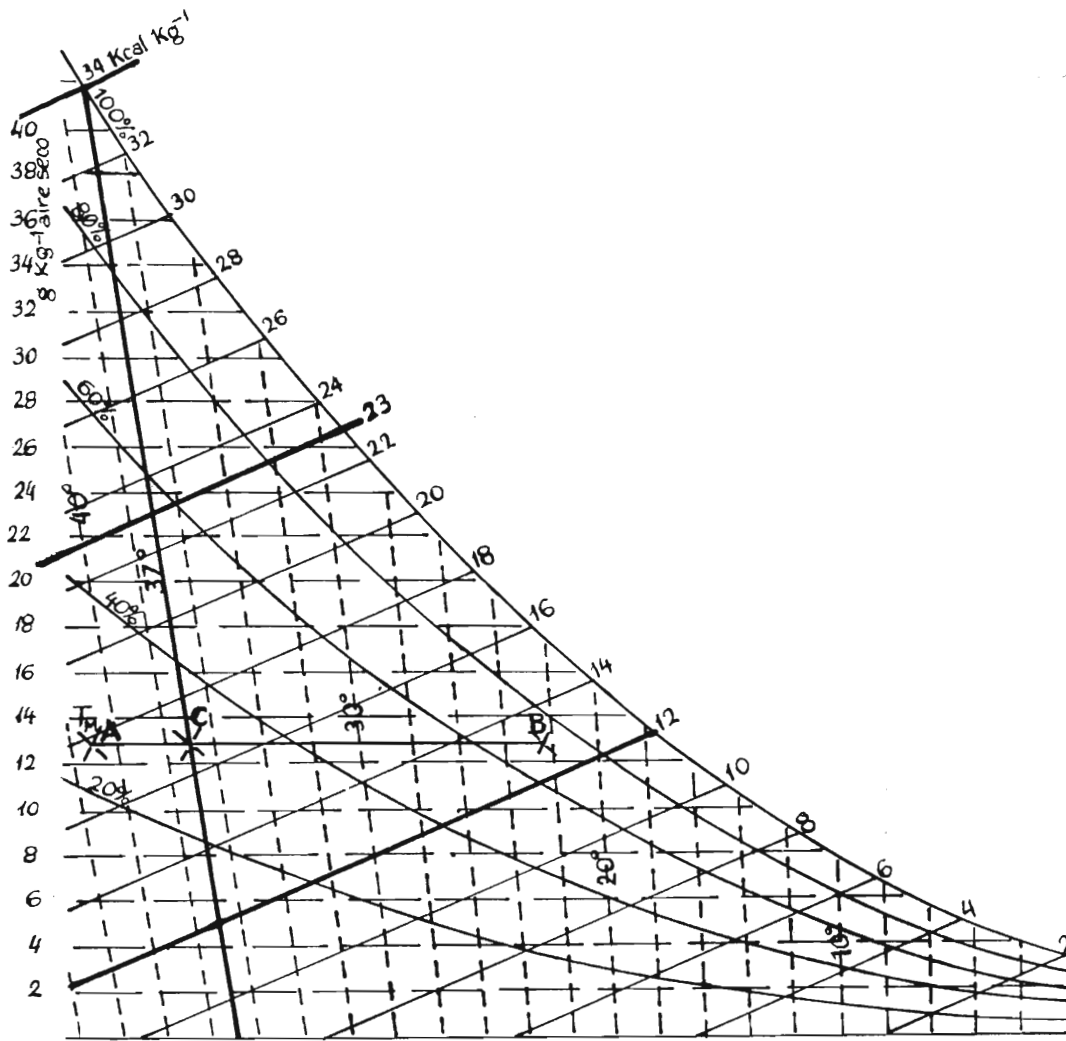


Figura 1.—Gráfica termosicrométrica con un ejemplo de determinación del índice climático de riesgo de accidentes de colapso por calor húmedo.

rresponde a un punto representativo con la máxima de máximas en todo este período y con la humedad media, la misma que la del punto B para el que la temperatura es la media del trentenio. El punto C viene determinado por corte del segmento AB por la isoterma de 37 °C, la temperatura del cuerpo humano. Por simple cociente relaciono las longitudes de AC y AB y tengo el índice que propongo como indicador mayor o menor según su propia cuantía del riesgo de presentación de acci-

dentés de colapso por calor húmedo. Las líneas en que AC es claramente distinto de cero suceden en Verano. Se ha confeccionado la tabla que sigue con los valores de ese índice, señalándose sólo meses y localidades en que sea importante, de entre las más de 50 analizadas que corresponden casi idénticamente con las 50 capitales de provincia españolas. Casi todos los datos de valores medios en los meses de Verano o próximos están entre las isoentálpicas de 12 y 23 kcal.

TABLA 1.—Índice de riesgo de colapso por calor húmedo

Observ. Meteorol.	MESES			
	Junio	Julio	Agosto	Sepbre.
Lugo		0,07	0,14	
Santiago		0,07	0,12	
Vigo		0,13		
Orense		0,09		
Ponferrada		0,05	0,22	
Santander			0,18	
Bilbao	0,22	0,07		
León			0,09	
Zamora		0,21	0,23	
Palencia	0,11	0,26	0,19	
Valladolid		0,21	0,12	
Soria		0,08		
Salamanca		0,21	0,21	0,07
Segovia	0,07	0,15	0,22	
Madrid	0,26	0,47	0,41	
Guadalajara		0,12	0,13	
Toledo	0,35	0,55	0,52	
Cuenca		0,22		
Ciudad Real	0,37	0,72	0,57	0,26
Albacete	0,21	0,60	0,4	
Cáceres	0,32	0,67	0,59	0,16
Badajoz	0,39	0,72	0,62	0,26
Vitoria		0,16	0,16	
Logroño	0,17	0,23	0,25	
Pamplona	0,07	0,15	0,27	0,11
Huesca	0,14	0,28	0,16	
Zaragoza	0,27	0,34	0,46	
Lérida	0,24	0,41	0,33	0,09
Gerona	0,23	0,24	0,14	
Castellón			0,19	
Valencia		0,37	0,20	
Alicante		0,49	0,42	0,16
Murcia	0,39	0,55	0,59	0,19
Sevilla	0,56	0,89	0,84	0,41
Córdoba	0,54	0,82	0,46	0,34
Jaén	0,31	0,72	0,61	0,23
Granada	0,21	0,73	0,32	0,24
Huelva	0,42	0,54	0,54	0,20
Málaga	0,26		0,52	0,23
Palma de Mallorca	0,05	0,17		
S. C. Tenerife		0,41	0,32	0,09
Las Palmas		0,39		
Melilla	0,03	0,45	0,27	
Ceuta		0,11	0,54	

El riesgo es mayor para mayor valor del índice. Cuando no se cita valor del índice es que el riesgo normal es prácticamente inexistente, como ocurre para los meses no incluidos y para otros Observatorios, como los de La Coruña, Pontevedra, Gijón, Oviedo, San Sebastián, Burgos, Navacerrada y algún otro. El riesgo para situaciones individuales de enfermedad, ejercicio extenuante o condiciones artificiales de ambiente, por supuesto que es independiente de los valores señalados en la tabla.

REFERENCIAS

- (1) BARTLETT, A. 1983: Death in a hot tube: The Physics of heat stroke. *Am. J. Phys.* vol. 51, n.º 2, p. 127-130.
- (2) HEIMS, S. P. 1970, "Polarización Dinámica y Biología". *Am. J. Physics*, vol. 38, n.º 9, p. 1.128.
- (3) KNOCHER, J. P. 1974: *Arch. Intern. Med.* 33, p. 841.
- (4) LIST, R. J. *Smithsonian Meteorological Tables. Diversas tablas y valores de constantes.*
- (5) PALACIOS, J. 1947: *De la Física a la Biología.* Ed. Espasa Calpe. Madrid.
- (6) RAZNJEVIC, 1970: *Tables et diagrammes thermodynamiques.* Ed. Eyrolles. París.
- (7) SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, J. 1974: Fórmulas con números adimensionales en convectividad. *Anales R.S.E. Fís. Quím.* p. 313.
- (8) SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, J. 1975. *Termodinámica y Termotecnia* (442 p) Madrid.
- (9) SARGENT, G. P. 1980: Computation of vapour pressure, dew point and relative humidity from dry and wet bulb temperatures. *Met. Mag.* 109.
- (10) SCHOLANDER, P. F. 1957: The wonderful Net. *Scientific American.* Abril 1957.
- (11) SCHRÖDINGER, E. 1947: What is Life?
- (12) S.M.N. Guía resumida del tiempo en España. (Datos de 1901-30) Madrid (publicación interna).