

Monograph

Límites Impuestos al Ejercicio por un Medio Ambiente Caluroso

Ethan R Nadel¹

¹Director, The John B. Pierce Laboratory. Professor, Department of Epidemiology and Public Health, and Cellular and Molecular Physiology, Yale University School of Medicine, New Haven, CT. Member, Sports Medicine Review Board, Gatorade Sports Science Insti

RESUMEN

Puntos Claves

1. La aparición temprana de la fatiga durante el ejercicio, en el calor, puede deberse a efectos directos de la hipertermia, o a efectos indirectos asociados con la disminución de volumen sistólico cardíaco máximo (con una concomitante reducción del VO_2 máx.), resultante de redistribución periférica del volumen de sangre.
2. El calor generado como un producto inherente del metabolismo durante el ejercicio, es disipado de la piel por convección, radiación y evaporación. En un medio ambiente cálido la disipación del calor por convección y radiación es mínima, y la carga total del calor del ejercicio debe ser disipada por evaporación. En un medio ambiente cálido y húmedo, la disipación del calor por evaporación es mínima y por lo tanto, suele ocurrir una hipertermia progresiva.
3. La progresiva deshidratación resultará en una respuesta menos efectiva de las glándulas sudoríparas al calor corporal, con un incremento de la temperatura corporal central, relativamente mayor durante el ejercicio. Esto reduce el margen de seguridad entre la temperatura central del cuerpo habitual y la temperatura límite.

Palabras Clave: clima cálido, aptitud física, entrenamiento, rendimiento, estrés térmico

INTRODUCCION

La fatiga puede definirse en términos muy simples como la incapacidad para mantener un esfuerzo de potencia, o la incapacidad para mantener una tensión muscular, en un período de tiempo dado (1). La fatiga que se desarrolla durante una contracción voluntaria máxima tiene una causa diferente de aquélla que se desarrolla durante repetidas contracciones moderadas, y ambas difieren de la fatiga generada durante el ejercicio en un medio ambiente caluroso. Finalmente, todas las formas de fatiga durante el ejercicio son consecuencia de la incapacidad para generar energía, en un porcentaje suficiente para satisfacer los requerimientos de energía para contraer los músculos del esqueleto. Nosotros examinaremos las causales por las cuales, ante un ejercicio en un medio ambiente caluroso, aparece la fatiga en forma precoz, y de ahí en más, como actúa limitando la performance.

Para entender completamente los medios por los cuales la fatiga puede dificultar la performance física, tenemos que entender que la potencia aeróbica máxima depende de numerosos factores, muchos de los cuales varían durante el ejercicio, especialmente en el calor. Un reordenamiento de la ecuación de Fick revela que la potencia aeróbica máxima puede cambiar si algunos de sus factores componentes varía:

$$VO_2 \text{ máx.} = [\text{HR máx.}] \cdot [\text{SV máx.}] \cdot [(\text{a-v}) O_2 \text{ máx.}]$$

Donde:

$VO_2 \text{ máx.} = \text{Potencia aeróbica máxima (ml } O_2/\text{min.)}$

$HR \text{ máx.} = \text{Frecuencia cardiaca máxima (lat./min.)}$

$SV \text{ máx.} = \text{Volumen sistólico cardíaco máximo (ml eyección/lat.)}$

$(a-v)O_2 \text{ máx.} = \text{Diferencia arterio-venosa de } O_2 \text{ máxima (ml } O_2/\text{ml de sangre)}$

Cualquier disminución en $HR \text{ máx.}$, $SV \text{ máx.}$ o $(a-v) O_2 \text{ máx.}$ durante ejercicios prolongados disminuirá, por definición, el $VO_2 \text{ máx.}$, y por lo tanto disminuirá finalmente la performance. Por ejemplo, un incremento agudo en el volumen de la sangre circulante en la periferia, debajo del nivel del corazón (en el reservorio o pool venoso) disminuirá la presión de llenado cardíaco máximo, $SV \text{ máx.}$ y potencialmente, el $VO_2 \text{ máx.}$ Una excesiva temperatura corporal durante el ejercicio puede causar un estasis venoso, un $SV \text{ máx.}$ más bajo, (y quizás una $(a-v) O_2 \text{ máx.}$ más baja), y por lo tanto, generar una aparición temprana de la fatiga. Las causas por las cuales ocurren estos cambios, se describen en las siguientes secciones.

TRANSFERENCIA DEL CALOR EN EL CUERPO

Durante el ejercicio, el consumo de oxígeno de los músculos esqueléticos puede incrementarse, desde alrededor 1.5 ml/kg-min en un estado de reposo, a tanto como 150 ml/kg-min durante condiciones máximas. Finalmente, toda la energía liberada desde los músculos durante la actividad física aparece como calor. En una persona en reposo, toda la producción de calor del cuerpo es equivalente a alrededor de 70 watts (70 w=1 kcal/min). Durante el ejercicio intensivo prolongado, tal como una carrera de maratón, el porcentaje de la producción de calor puede exceder 1000 watts (1000 w=14.3 kcal/min). Una carga térmica de esta magnitud subiría la temperatura central del cuerpo 1°C, cada 5 a 8 min, sino hubiera cambios en los mecanismos de disipación del calor. El ejercicio podría limitarse a menos de 20 min, antes que pudieran darse síntomas de la fatiga por los efectos de la hipertermia. Estos síntomas pasan de suaves dolores de cabeza y desorientación a pérdida de conciencia. Obviamente, la actividad física intensa puede continuar por mucho más de 20 minutos, debido primariamente a la efectividad del sistema termoregulatorio que actúa alterando las tasas de transferencia del calor, en respuesta a estímulos específicos.

En el momento del comienzo del ejercicio, el porcentaje de la producción de calor muscular aumenta como una función de la intensidad del ejercicio, y transitoriamente excede el porcentaje de disipación del calor del músculo. Saltin et al. (9), han mostrado que el valor de la temperatura aumenta en la masa del grupo de los músculos cuádriceps, aproximadamente 1.0°C/min, durante los momentos iniciales del ejercicio de alta intensidad en bicicleta ergométrica. Este valor de acumulación de calor no puede persistir, en tanto que la maquinaria muscular podría ser inactivada por los efectos de hipertermia en unos 10 min.

Los mecanismos principales por los cuales el calor es trasladado desde el músculo hacia el flujo sanguíneo, durante el ejercicio, son vía transferencia convectiva.

El porcentaje de la transferencia de calor es proporcional al producto del flujo local de sangre y la diferencia de temperatura entre el músculo y de la sangre arterial que contribuye a la temperatura central del cuerpo. Por eso, la mayoría del calor generado al contraerse los músculos esqueléticos es transferida hacia la temperatura central, vía circulación venosa. Mientras esto ocurre, la temperatura del cuerpo comienza a subir, poniendo en funcionamiento reflejos que promueven un incremento de la transferencia de calor, desde el centro hacia la piel, y desde la piel hacia el medio ambiente. Los reflejos de disipación del calor sirven para retrasar, y eventualmente, detener el ascenso de la temperatura central.

El valor de la transferencia de calor desde el centro del cuerpo hacia la piel es determinado por la diferencia de temperatura entre el centro y la piel y el flujo sanguíneo y la piel. El valor del flujo sanguíneo de la piel está bajo control fisiológico. Durante el ejercicio en el calor, el flujo sanguíneo de la piel puede ser tanto como 20 veces mayor que durante una exposición en reposo en un medio ambiente frío, cuando la piel está vasocontraída en forma máxima. Dado que el valor de la transferencia de calor es el producto del flujo sanguíneo de la piel y la diferencia de temperatura entre el centro corporal y la piel, un alto flujo de la sangre de la piel puede no ser suficiente para expulsar el calor del cuerpo central durante el ejercicio en un día húmedo y caliente, cuando la temperatura de la piel aumenta debido a una incapacidad para evaporar la sudoración.

TRANSFERENCIA DEL CALOR DESDE EL CUERPO

Como mencionamos anteriormente, el calor es transferido desde la piel al medio ambiente por convección, radiación y evaporación. Los valores de la transferencia de calor de la piel hacia el medio ambiente por convección y radiación son funciones de los coeficientes de la transferencia de calor (h_c y h_r , respectivamente) y de las diferencias de temperatura entre la piel y el medio ambiente. La transferencia de calor radiativa y convectiva están bajo control fisiológico, sólo en la medida en que los cambios en el flujo de sangre de la piel determinan cambios en el promedio de temperatura de la piel. Ambas, h_c y h_r , dependen del área de superficie corporal disponible para el intercambio de calor con el medio ambiente. Bajo condiciones ambientales e internas constantes, el valor de h_r es constante, pero el valor de h_c varía directamente con la velocidad del aire (6). El coeficiente combinado (y por lo tanto el valor de la transferencia de calor convectiva) puede variar cinco veces, entre el estar en reposo ante un aire inmóvil y estar corriendo en un día con brisa. De todos modos, en un día muy caluroso, cuando la diferencia entre la temperatura de la piel y la del ambiente es pequeña, la capacidad para transferir el calor desde la piel al medio ambiente, vía convección o radiación, es probablemente pequeña y de ayuda limitada en la disipación de la carga térmica del ejercicio.

Los medios primarios por los cuales los humanos son capaces de disipar la carga térmica del ejercicio, especialmente cuando el ejercicio es realizado en el calor, es vía evaporación de la sudoración a partir de la superficie de la piel. El valor de la evaporación es dependiente del coeficiente de transferencia de calor (h_e) evaporativo y del gradiente de presión del vapor de agua entre la piel y el medio ambiente. El valor de h_e depende de la velocidad del aire, en un estilo similar a aquel para h_c (donde $h_e = 2.2 h_c$). La presión de vapor de agua de la piel es principalmente una función del valor de sudoración, y por lo tanto está bajo control fisiológico. Cada gramo de agua que se evapora de la superficie de la piel expulsa casi aproximadamente 0.6 kcal del calor del cuerpo. Dado que las glándulas sudoríparas de una persona apta o en "estado", pueden transportar el sudor hacia la superficie de la piel a un valor superior a los 30 g/min, aproximadamente todo el calor producido durante un ejercicio intenso podría ser disipado por evaporación, bajo condiciones ideales.

La eficiencia de la ruta evaporativa para la transferencia de calor es dependiente de factores fisiológicos y del medio ambiente. Si la humedad del medio ambiente es alta, el gradiente de la piel hacia el medio ambiente para la presión del vapor de agua será menor y la tasa de evaporación sería proporcionalmente más baja. En un día húmedo y caluroso, el calor perdido por convección y radiación es bajo, debido al pequeño gradiente de temperatura de la piel hacia el medio ambiente, y la disipación del calor por evaporación es probablemente baja, debido al pequeño gradiente de piel hacia el medio ambiente, para la presión del vapor de agua. Bajo estas condiciones, un esfuerzo de entrenamiento (el cual incrementa la producción de calor), acoplado con el bajo valor de la disipación del calor, tenderá a incrementar el calor almacenado en el cuerpo, lo que generará una hipertermia progresiva.

Con el conocimiento de los coeficientes de calor y como ellos varían bajo condiciones diferentes, parece posible predecir, o al menos anticipar, la magnitud del cambio de la temperatura interna del cuerpo durante el ejercicio a intensidades dadas en condiciones de medio ambiente variables. Este conocimiento es importante para el atleta, porque la imposibilidad de mantener una temperatura del cuerpo óptima durante el ejercicio, puede reducir la performance y resultaría en una aparición temprana de la fatiga.

Es importante darse cuenta que la elevada temperatura central del cuerpo asociada con el ejercicio no está regulada a elevados niveles. Esto alcanza ese nivel como consecuencia de: 1) el desequilibrio temporario entre las tasas de producción de calor y de disipación de calor; y 2) la rapidez con la cual el mecanismo de disipación de calor responde a un incremento en la temperatura central del cuerpo. El entrenamiento físico induce a un incremento en la sensibilidad de la relación tasa de sudoración/temperatura interna, tanto como en la disminución del umbral de la temperatura interna para el comienzo del mecanismo de sudorar (5), lo que permite a la temperatura interna permanecer a un nivel más bajo, que aquel visto en una persona fuera de estado. Esto resulta, de alguna manera, en un mayor margen de seguridad entre las temperaturas de operación y las temperaturas límites, y da lugar a una menor demanda de la circulación periférica durante el ejercicio. De todos modos, la deshidratación progresiva durante el ejercicio en el calor reduce la sensibilidad de la relación, tasa de sudoración/temperatura interna y esto resulta en una hipertermia relativa. Esto reduce el margen de seguridad y lleva a generar estados de fatiga precoz.

PROBLEMAS ASOCIADOS A MEDIO AMBIENTES CALIDOS

La capacidad para suministrar un adecuado flujo de sangre hacia el aparato músculo-esquelético contraído y hacia la piel, bajo condiciones en las cuales ambos tejidos requieren un alto flujo, dependen ampliamente de la capacidad del cuerpo de

mantener un volumen de sangre central adecuado. Durante el ejercicio suave en un medio ambiente frío, el corazón tiene pocas dificultades en proveer un adecuado flujo de sangre para cubrir las demandas musculares y de la piel (3, 8). Sin embargo, el ejercicio prolongado en el calor presenta un problema más complejo. No sólo se trata de la capacidad de mantener un volumen de bombeo cardíaco adecuado durante el ejercicio, amenazado por el desplazamiento de una porción del volumen de sangre hacia la periferia, sino que, además, la continua pérdida de agua del cuerpo debido a la evaporación del sudor, puede comprometer el retorno venoso. Bajo estas circunstancias, la presión arterial de la sangre puede disminuir, pero un incremento en el ritmo cardíaco puede, parcialmente, compensar la disminución en el volumen submáximo de bombeo cardíaco. El volumen sistólico cardíaco submáximo disminuirá, de todos modos, y por ello el $\text{VO}_2\text{máx.}$ y la performance se reducirán. La primera línea de reflejo de defensa en contra de una caída central de la presión venosa parece ser una redistribución del flujo de sangre desde la periferia (2, 10), sirviendo para reducir el volumen de sangre en las venas periféricas. La consecuencia primaria de una relativa restricción en el flujo de sangre de la piel durante el ejercicio prolongado en el calor, de todos modos, es que el valor óptimo de transferencia de calor no puede ocurrir. Bajo condiciones de ambiente cálido hubo voluntarios que se ejercitaron acumulando calor a un valor de 0.1 °C/min (3), una tasa de acumulación que limitaría el ejercicio debido a la hipertermia, si se continuaba por mucho tiempo.

Los efectos más serios del ejercicio prolongado en el calor ocurren debido a la hipovolemia progresiva (más bajo que el volumen normal de sangre) que acompaña a la deshidratación. En realidad, el volumen de sangre se defiende razonablemente bien durante la deshidratación porque la hipertonicidad que ocurre al perder agua del compartimento vascular tiende a extraer agua de los compartimentos de fluido intersticial e intracelular hacia el sistema vascular (7). Sin embargo, eventualmente la hipovolemia induce un cambio hacia arriba en el umbral de la temperatura interna para la vasodilatación cutánea y una reducción en el flujo máximo de sangre a la piel (4). Esta hipertermia combinada con un volumen de bombeo cardíaco máximo menor y un $\text{VO}_2\text{máx.}$ más bajo, comprometerá la capacidad de prolongar el ejercicio a una intensidad elevada.

CONCLUSIONES

El medio ambiente implica muchos límites sobre la capacidad para realizar ejercicio físico. La potencialidad de la hipertermia para comprometer la performance es generalmente mediatizada, vía su influencia sobre la capacidad del cuerpo para transferir oxígeno del medio ambiente hacia los músculos esqueléticos contraídos. Un aumento excesivo de la temperatura durante el ejercicio reduce la efectividad del sistema circulatorio, limitando la capacidad cardiaca para la distribución de sangre oxigenada a la tasa requerida, hacia la piel y los músculos.

REFERENCIAS

1. Edwards, R.H.T (1981). Human muscle function and fatigue. *In Human Muscle Fatigue: Physiological Mechanisms. Ciba Foundation Symposium 82, pp. 1-18. Pitman Medical, London*
2. Johnson, J.M., Rowell, L.B., Niederberger, M., and Eisman, M.M (1974). Human splanchnic and forearm vasoconstrictor responses to reductions of right atrial and aortic pressures. *Circ. Res. 34: 515-525*
3. Nadel, E.R., Cafarelli, E., Roberts, M.F., and Wenger, C.B (1979). Circulatory regulation during exercise in different ambient temperatures. *J. Appl. Physiol. 46: 430-437*
4. Nadel, E.R., Fortney, S.M., and Wenger, C.B (1980). Effect of hydration state on circulatory and thermal regulations. *J. Appl. Physiol. 49: 715-721*
5. Nadel, E.R., Pandolf, K.B., Roberts, M.F., Wenger, C.B., and Stolwijk, J.A.J (1974). Mechanisms of thermal adaptation to exercise and heat. *J. Appl. Physiol. 37: 515-520*
6. Nishi, Y., and Gagge, A.P (1970). Direct evaluation of convective heat transfer coefficient by naphthalene sublimation. *J. Appl. Physiol. 29: 603-609*
7. Nose, H., Mack, G.W., Shi, X., and Nadel, E.R (1988). Role of osmolality and plasma volume during rehydration in humans. *J. Appl. Physiol. 65: 325-331*
8. Rowell, L.B., Marks, H.J., Bruce, R.A., Conn, R.D., and Kusumi, F (1966). Reductions in cardiac output, central blood volume and stroke volume with thermal stress in normal men during exercise. *J. Clin. Invest. 43: 1801-1816*
9. Saltin, B., Gagge, A.P., and Stolwijk, J.A.J (1968). Muscle temperature during submaximal exercise in man. *Appl. Physiol. 25: 679-688*
10. Tripathi, A., Mack, G.W., and Nadel, E.R (1989). Peripheral vascular reflexes elicited during lower body negative pressure. *Aviat. Space. Environ. Med. 60: 1187-1193*

Cita Original

Ethan R. Nadel. Límites Impuestos al Ejercicio por un Medio Ambiente Caluroso. Reproducido del artículo original publicado en Sports Science Exchange, Gatorade Sports Science Institute. Exercise and Environment, Vol. 3, Number 27, Pulí; 1990.