

August Krogh Institute (Head: Pr. Dr. Bengt Saltin)
University of Copenhagen, Denmark

Efecto de altitudes moderadas (900, 1.200 y 1.500 m. sobre el nivel del mar) en el consumo máximo de oxígeno

Nicolás Terrados*; Masao Mizuno y Helle Andersen

Resumen

Con el fin de comprobar la hipótesis de que los deportistas de élite disminuyen su rendimiento en altitud más que las personas de vida sedentaria y encontrar la altitud a la que esa disminución se inicia, se estudiaron 16 sujetos (8 deportistas de élite y 8 personas sedentarias) en una cámara hipobárica a altitudes simuladas de 900, 1.200 y 1.500 metros sobre el nivel del mar. A 900 m., el $\dot{V}O_2MÁX.$ de los deportistas disminuyó significativamente ($p < 0.05$) mientras que los sedentarios no se vieron afectados. A 1.200 y 1.500 m. los dos grupos redujeron su $\dot{V}O_2MÁX.$, pero los deportistas entrenados lo hicieron más ($p < 0.05$). Los valores obtenidos en SaO_2 , PaO_2 , $PaCO_2$ y $PA-aO_2$ durante las pruebas y la capacidad de difusión pulmonar (DLO_2) estimada en reposo indican que en personas entrenadas, la capacidad de difusión pulmonar puede ser un factor limitante del $\dot{V}O_2MÁX.$

Introducción

Ni la ventilación, ni la capacidad de difusión pulmonar, se han considerado como factores limitantes del consumo máximo de oxígeno ($\dot{V}O_2MÁX.$) en personas sanas, realizando ejercicio a nivel del mar. Es principalmente el aparato cardio-circulatorio el que se piensa que lo limita. El entrenamiento en resistencia produce una serie de adaptaciones en los pulmones, músculos, corazón y en las funciones que éstos realizan (véase Blomqvist y Saltin, 1.983), sin embargo la capacidad de difusión pulmonar permanece inal-

terada o —en todo caso—mejora muy poco con el entrenamiento (Reuschlein et. al. 1.968).

Dependiendo del nivel de entrenamiento, las personas pueden utilizar diferentes fracciones de la capacidad de sus pulmones para introducir oxígeno, cuando realizan ejercicio de intensidad máxima (Blomqvist et. al. 1.969). Esto es, las personas de vida sedentaria, en las que el aparato muscular tiene pocas demandas de oxígeno al realizar ejercicio máximo, necesitarían utilizar una fracción menor de su capacidad de difusión pulmonar que las personas de muy buena capacidad física, en las

que su aparato muscular —con mayor cantidad de enzimas, mitocondrias y capilares—demanda (y consume) grandes cantidades de oxígeno.

El objetivo de este estudio era comprobar si personas muy bien entrenadas, al estar utilizando, en condiciones normales (nivel del mar), prácticamente toda su capacidad de difusión pulmonar, cuando realizan ejercicio máximo, se veían más afectadas que las de vida sedentaria al realizar ejercicio máximo a presiones atmosféricas menores (altitud).

Se escogieron para los tests las altitudes de 0, 900, 1.200 y 1.500 metros sobre el nivel del mar, con el fin de encontrar la altitud a la que el efecto en el rendimiento empezaba a ser apreciable.

Sujetos

Dieciseis hombres jóvenes y sanos, que residen normalmente a nivel del mar, sirvieron como voluntarios en este estudio. Ocho de ellos eran deportistas de élite daneses —cinco ciclistas y tres corredores de fondo— (Grupo Entrenado), los otros ocho no realizaban ningún tipo de entrenamiento o actividad física pro-

* Resumen de la ponencia presentada en el International Symposium of Clinical Physiology, 1984. Lund, Sweden.

GRUPO	EDAD (años)	ESTATURA (cm.)	PESO (kg.)	VO ₂ MAX. (ml · kg ⁻¹ · min ⁻¹)
ENTRENADO				
media	23.8	178.7	68.7	71.8
n = 8SD	4.4	5.7	4.2	4.9
rango	17-30	172-186	66.0-76.1	66.1-82.8
SEDENTARIO				
media	24.1	181.6	77.7	48.7
n = 8 SD	3.0	10.9	11.8	7.6
rango	20-30	168-198	62.0-101.5	36.9-61.1

Tabla 1 Características de los sujetos.

gramada —excepto el uso de la bicicleta como medio de transporte habitual— (Grupo Sedentario).

La edad y estatura de los sujetos era similar, y el peso medio 9 kg. más elevado en el Grupo Sedentario que en el Entrenado. La condición física de los dos grupos —expresada como valores de $\dot{V}O_2$ MÁX.— era tanto en litros de oxígeno por minuto como en mililitros por minuto y kilo de peso, significativamente más alta en el Grupo Entrenado, no llegando el valor más alto del Grupo Sedentario a alcanzar el más bajo del Grupo Entrenado. Los valores medios de las características de los sujetos están expresados en la TABLA 1.

Procedimiento y métodos

Todos los sujetos realizaron los tests de ejercicio máximo en una bicicleta ergométrica frenada eléctricamente (modelo A. Krogh), a la que se había familiarizado con anterioridad, dentro de una cámara hipobárica, a presiones barométricas de 760, 682, 657 y 634 mm. Hg. que corresponden a altitudes similares a 0, 900, 1.200 y 1.500 metros sobre el nivel del mar, respectivamente.

El test consistía en 6 minutos de calentamiento usando una in-

tensidad de 170 W. en los sujetos entrenados y 120 W. en los no entrenados, seguidos de incremento de 50 W. en los entrenados y 25 W. en los sedentarios, cada 2 minutos hasta la extenuación del sujeto. El test comenzaba, al menos, 15 minutos después de alcanzada la altitud previamente determinada. Las variables respiratorias ($\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}E$) y cardíacas (E.C.G.) fueron determinadas continuamente durante el test. Cada sujeto realizó el test, tres veces consecutivas, con 30 minutos de reposo entre ellos. La presión-altitud se escogió cada vez al azar entre las mencionadas anteriormente, sin que los sujetos supieran de qué altitud se trataba (con el fin de evitar posibles efectos psicológicos). En nueve sujetos (cinco entrenados y cuatro sedentarios) se obtuvieron muestras de sangre arterial en reposo y durante los tests a 0, 900 y 1.500 m., mediante un cateter introducido en la arteria branquial.

La saturación de oxígeno (SaO_2) en las muestras de sangre arterial, se midió en un hemoxímetro OSM-2 (Radiometer, Copenhagen), que fue calibrado con varias muestras de sangre completamente oxigenada, analizada espectrofotométricamente por el método de la cyanmethemoglobina. PaO_2 , $PaCO_2$ y pH de las muestras de sangre se

valoraron con una unidad de microelectrodos pHM73 (Radiometer, Copenhagen). Las concentraciones de Acido Láctico se analizaron con espectrofotómetro. El aire expirado por el sujeto se recogió en sacos de Douglas. El volumen expirado se midió usando un espirómetro TISSOT. Los porcentajes de O_2 y CO_2 se determinaron con un analizador paramagnético de O_2 (Servo mex) y un analizador de CO_2 por infrarrojos (Beckman LB-2), calibrados con mezclas de gases previamente analizados mediante la técnica de Sholander.

Con el fin de evaluar si realizar tres tests de ejercicio máximo podría tener algún efecto negativo en los valores de $\dot{V}O_2$ MÁX., ocho de los sujetos realizaron, con anterioridad al inicio de este estudio, tres tests consecutivos a nivel del mar (con 30 min. de descanso entre cada test), y se comprobó que las variaciones en los valores de $\dot{V}O_2$ MÁX. de los tests de cada sujeto, estaban dentro del error del método ($\approx 3\%$).

Resultado y discusión

Consumo máximo de oxígeno

El $\dot{V}O_2$ MÁX. del Grupo Sedentario no se vió afectado a la altitud de 900 m., mientras que

GRUPO SEDENTARIO

VARIABLE	n	ALTITUD (m.)		
		0	900	1.500
VO ₂ max. (ISTPD · min ⁻¹)	8	3.80 ± 0.64	3.70 ± 0.57	3.59 ± 0.63*
VE BTSP/VO ₂ (1BTSP · 1STPD ⁻¹)	8	37.86 ± 5.22	42.77 ± 5.19*	43.70 ± 10.31*
F.C. (lat · min ⁻¹)	8	198.00 ± 12.10	195.80 ± 15.30	196.80 ± 9.50
SaO ₂	5	97.25 ± 1.31	95.35 ± 1.12*	93.05 ± 1.70*
PaO ₂ (mmHg)	5	93.42 ± 2.51	77.85 ± 2.00*	67.87 ± 2.91*
PA-aO ₂ (mmHg)	5	24.21 ± 5.39	27.43 ± 6.44	25.71 ± 8.37
PaCO ₂ (mmHg)	5	32.40 ± 3.00	30.10 ± 5.50	30.40 ± 4.40
pH	5	7.30 ± 0.06	7.30 ± 0.05	7.31 ± 0.05
Láctico (mmol · l ⁻¹)	5	7.17 ± 2.00	8.58 ± 1.39	7.34 ± 1.34

* Valor significativamente diferente del obtenido a nivel del mar (p < 0.05).

Tabla 2 Valores obtenidos durante el esfuerzo máximo. (media ± SD).

en el Grupo Entrenado sufrió una reducción significativa (p < 0.05) con un valor medio de 0.37 l/min.

A 1.200 y a 1.500 m. los dos grupos redujeron significativamente su VO₂MÁX., pero el Grupo Entrenado lo hizo más que el Sedentario. (Figura 1).

Los valores medios de la reducción en VO₂MÁX. en el Grupo Entrenado y en el Sedentario fueron: 0.43 l/min. y 0.20 l/min. respectivamente, a 1.200 m. sobre el nivel del mar, siendo 0.63 l/min. y 0.21 l/min. a 1.500 m. (p < 0.05). (TABLAS 2 y 3).

Estos resultados están en concordancia con los publicados recientemente por Squires y Buskirk (1.982). Ellos mostraron una reducción en el VO₂MÁX. de personas bien entrenadas físicamente durante la exposición a una altitud de 1.219 m. sobre el nivel del mar, y también por encima de ella. Sin embargo, nuestro Grupo Entrenado reveló una mayor susceptibilidad a la altitud de 900m. que los sujetos del mencionado estudio, quizás debido a sus mayores VO₂MÁX. a nivel del mar, 71,8 ml · Kg⁻¹ · min⁻¹ por sólo 60.4 en el estudio

de Squires y Buskirk (1.982).

No conocemos por el momento más estudios a estas altitudes quizás debido a que hasta ahora no se pensó en la posibilidad de que el rendimiento físico de deportistas de alto nivel pudiera verse afectado a "tan sólo" una altitud de 900 m. sobre el nivel del mar.

Oxigenación de la Sangre Arterial

En reposo, los valores de PaO₂ y de SaO₂ fueron los mismos en

GRUPO ENTRENADO

VARIABLE	n	ALTITUD (m.)		
		0	900	1.500
VO ₂ max. (ISTPD · min ⁻¹)	8	4.96 ± 0.46 ^x	4.59 ± 0.40 ^{*x}	4.33 ± 0.40 ^{*x}
VE BTSP/VO ₂ (1BTSP · 1STPD ⁻¹)	8	29.58 ± 1.22 ^x	32.69 ± 3.05 ^{*x}	34.50 ± 5.40 ^{*x}
F.C. (lat · min ⁻¹)	8	203.10 ± 5.70	203.70 ± 4.70	202.20 ± 6.80
SaO ₂	5	93.30 ± 2.13 ^x	89.00 ± 1.29 ^{*x}	83.34 ± 4.13 ^{*x}
PaO ₂ (mmHg)	5	72.36 ± 4.23 ^x	60.48 ± 4.85 ^{*x}	51.94 ± 2.74 ^{*x}
PA-aO ₂ (mmHg)	5	35.30 ± 7.01 ^x	36.18 ± 8.69 ^x	35.29 ± 7.50 ^x
PaCO ₂ (mmHg)	5	40.90 ± 4.80 ^x	36.10 ± 6.00 [*]	34.60 ± 6.80 [*]
pH	5	7.29 ± 0.05	7.30 ± 0.07	7.27 ± 0.09
Láctico (mmol · l ⁻¹)	5	5.72 ± 2.19	6.58 ± 1.69	7.95 ± 3.61

* Valor significativamente diferente del obtenido a nivel del mar (p < 0.05).

^x Valor significativamente diferente del Grupo Sedentario (p < 0.05).

Tabla 3 Valores obtenidos durante el esfuerzo máximo. (media ± SD).

las tres altitudes (0, 900 y 1.500 m.) a que se midieron, pero durante el ejercicio máximo el Grupo Entrenado mostró unos valores significativamente más bajos que el Grupo Sedentario, siendo la diferencia entre los dos grupos más amplia a 1.500 m. que a 900 m. ($p < 0.05$). (TABLAS 2 y 3).

Existen tres estudios previos demostrando una caída en SaO_2 (Rowell et. al., 1.964) y en PaO_2 (Dempsey et. al., 1.982; Hanson et. al., 1.982) en un grupo de atletas escogido de alto nivel, cuando realizaban ejercicio de máxima intensidad a nivel del mar. Lo cual parece indicar que deportistas de muy buena condición física pueden llegar a desaturar su sangre mucho más que las personas sedentarias, al realizar ejercicios máximos. Hay que hacer notas que en el presente estudio, el pH arterial y las concentraciones de Ácido Láctico en la sangre arterial durante los momentos de ejercicio de intensidad máxima, fueron similares en los dos grupos (TABLAS 2 y 3), lo que indica que todos los sujetos (sedentarios y entrenados) hicieron un esfuerzo a la máxima intensidad de sus posibilidades.

Respuesta Ventilatoria, Gradiente Alveolo-Arterial de Oxígeno, y Capacidad de Difusión Pulmonar

A pesar de la marcada hipoxemia en la sangre arterial de los sujetos entrenados, éstos presentaban unos coeficientes ventilatorios ($VE \text{ BTPS}/VO_2\text{STPD}$) que eran inferiores a los observados en los sujetos sedentarios. Y aunque la ventilación por litro de oxígeno consumido era más baja en los entrenados, la tensión alveolar de oxígeno (PA_2) era similar en los dos grupos, lo cual producía un gradiente $PA-aO_2$ mayor en el Grupo Entrenado

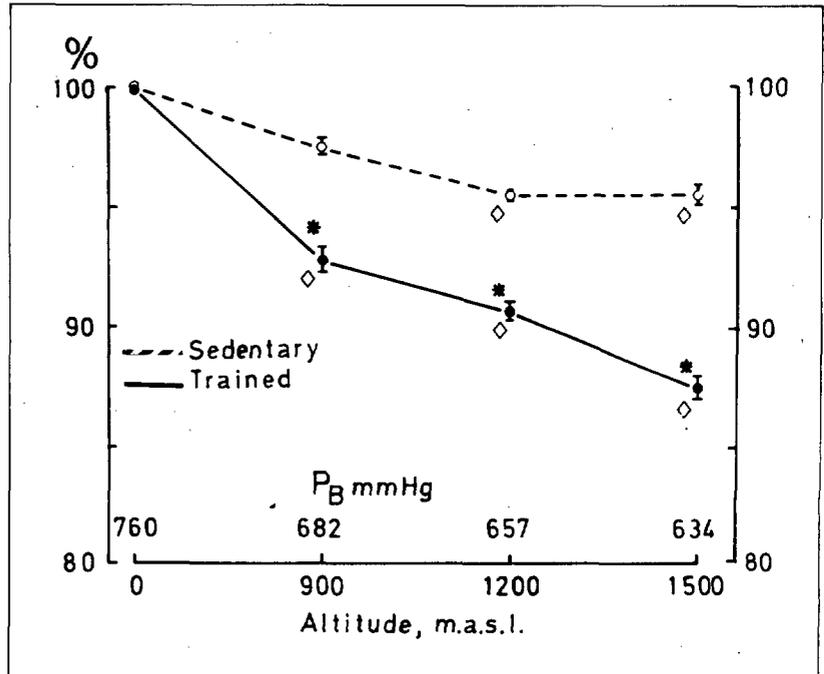


Figura 1 Porcentaje de los valores de $\dot{V}O_2\text{máx}$. en las diferentes altitudes siendo 100% el valor al nivel del mar (Media \pm SD).
 ◇ Significativamente diferente del valor a nivel del mar ($p < 0.05$).
 * Significativamente diferente del Grupo Sedentario ($p < 0.05$).

que en el Sedentario (véanse TABLAS 2 y 3).

Thews y Schmidt (1.976) han postulado que es especialmente en condiciones de hipoxia cuando el $PA-aO_2$ está en función del cociente entre la capacidad de difusión pulmonar y la perfusión, lo cual podría explicar en parte nuestros resultados. Los valores medios \pm SD de la capacidad de difusión pulmonar fueron 30.6 ± 5.1 y $25.8 \pm 5.3 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$ para el Grupo Entrenado y el Sedentario respectivamente. Al relacionar estos valores con los consumos de oxígeno máximos ($DLO_2/VO_2\text{MÁX}$), los valores tendían a ser inferiores en los sujetos entrenados.

Conclusiones

Las conclusiones de este estudio son:

- Las personas con altos valo-

res de consumo máximo de oxígeno se ven más afectados por la disminución de la tensión de oxígeno en el aire inspirado (altitud), que las personas sedentarias.

- Una explicación podría darla las menores capacidades de difusión pulmonar en relación con el consumo de oxígeno de las personas de alta condición física; pero su respuesta ventilatoria, algo limitada en ejercicio máximo, parece tener importancia también.

No podemos dejar de comentar la trascendencia que el conocimiento de estos detalles tiene para los países en los que la variada geografía hace que las competiciones deportivas se realicen a muy diferentes altitudes sobre el nivel del mar.

Este estudio fue posible gracias a una subvención del Research Council of Danish Sport Federation.

Bibliografía

BLOMQUIST, C.G.; JOHNSON, R.L.; JR. & SALTIN, B.: "Pulmonar diffusing capacity limiting human performance at altitude". *Acta Physiol Scand*, 76, 1969, pp. 284-287.

BLOMQUIST, C.G. & SALTIN, B.: "Cardiovascular adaptations to physical training". *Ann Rev Physiol*, 45, 1983, p. 169-189.

DEMPSEY, J.; HANSON, P.; PEGELOW, D. & FREGOSI, R.: "Mechanical vs. chemical determinants of hyperventilation in heavy exercise". *Med Sci Sports Exercise*, 14, 1982, p. 131.

HANSON, P.; CLAREMONT, A.; DEMPSEY, J. & REDDAN, W.: "Determinants and consequences of ventilatory responses to competitive endurance running". *J. Appl Physiol*, 52 (3), 1982, p. 615-623.

MEYER, M.; SCHEID, P.; RIEPL, G.; WAGNER, H.-J. & PIIPER, J.: "Pulmonary diffusing capacities for O₂ and CO measured by rebreathing technique".

J. Appl Physiol, 51 (6), 1981, p. 1643-1650.

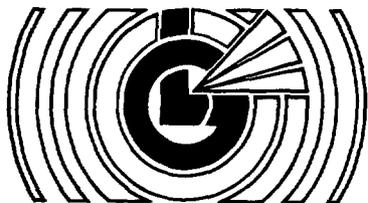
REUSCHLEIN, P.S.; REDDAN, W.G.; BURPEE, J.; GEE, J. B. L. & RANKIN, J.: "Effect of physical training on the pulmonar diffusing capacity during submaximal work". *J. Appl Physiol*, 24 (2), 1968, p. 152-158.

ROWELL, L. B.; TAYLOR, H.L.; WANG, Y. & CARLSON, W. S.: "Saturation of arterial blood with oxygen during maximal exercise". *J. Appl Physiol*, 19, 1954, pp. 284-286.

SQUIRES, R.W. & BUSKIRK, E. R.: "Aerobic capacity during acute exposure to simulated altitude, 914-2286 metres". *Med Sci Sports Exercise*, 14 (1), 1982, pp. 36-40.

THEWS, G. & SCHMIDT, W.: "Partitioning of the alveolar-arterial O₂ pressure difference under normal, hypoxic and hyperoxic conditions". *Respirations*, 33, 1976, pp. 245-255.

NOTA: Este estudio fue posible gracias a una subvención del Research Council of Danish Sport Federation.



LEOPOLDO GALMES
electromedicina

SERVICIO TECNICO Y ALMACEN:
OFICINAS COMERCIALES:

San Eusebio, 49-51, bajos 3.^a - Teléf. (93) 200 01 80 - BARCELONA-6
Plaza Cardona, 11, 1.^o, 4.^a - Teléf. (93) 209 97 26 - BARCELONA-6

DEPORTE CARDIOLOGIA



LEOPOLDO GALMES
electromedicina

Tres conceptos inseparables

- ELECTROCARDIOGRAFOS • ECOCARDIOGRAFOS •
- ERGOMETROS DE CINTA • CICLOERGOMETROS • MONITORES •
- SISTEMAS DE TELEMETRIA • DEFIBRILADORES • ETC. •