

Adaptación a la altura y a ambientes fríos en personas con lesión medular

Adaptation to high altitude and a cold environment in people with spinal cord injury

Frauzino FC ¹, Miguel M ², Delicado MC ¹, Vidal J ³, Soto C ¹, Medina J ³, Ventura JL ⁴, Javierre C ¹

¹ Departamento de Ciencias Fisiológicas II. ² Departamento de Patología y Terapéutica Experimental. Facultad de Medicina, Campus de Bellvitge, Universidad de Barcelona, L'Hospitalet de Llobregat. Barcelona. España. ³ Instituto de Neurorehabilitación Guttmann, Badalona, Barcelona. España. ⁴ Hospital Universitario de Bellvitge, L'Hospitalet de Llobregat, Barcelona. España.

Esta investigación ha sido financiada por FUNDACIÓN MAPFRE

Resumen

Objetivo: Estudiar las diferencias en la adaptación respiratoria al ejercicio en condiciones medioambientales similares a las de la práctica de los deportes de invierno, entre personas físicamente activas y sanas con lesión medular y sin lesión medular.

Material y método: Participaron 24 voluntarios sanos y físicamente activos, 12 presentaban en su historia una lesión medular y los otros 12 no. Cada sujeto realizó tres pruebas de esfuerzo máximas con monitorización ventilatoria, pero modificando las circunstancias ambientales: a nivel del mar y a 22 - 24° C; a 3.000 metros de altura simulada y a 22 - 24° C, y a 3.000 metros de altura simulada y a 5 - 6° C.

Resultados: Al comparar los valores observados en las pruebas de altura simulada respecto a la realizada a nivel del mar, se observó un aumento significativo de los valores del consumo de VO₂ y de la producción del VCO₂. Este aumento no se acompañó de modificaciones en la ventilación, la frecuencia respiratoria o el volumen corriente. Paralelamente, la fracción espirada para el O₂ y el CO₂, el equivalente respiratorio para el O₂ y el CO₂ o la presión al final de la espiración para el O₂ y el CO₂ mostraron cambios estadísticamente significativos.

Conclusiones: La realización de un esfuerzo intenso produce importantes cambios ventilatorios con necesidades de oxígeno superiores para una altura simulada de 3.000 metros que no cambian sustancialmente con el frío.

Palabras clave:

Lesión medular, ejercicio, hipoxia, frío, altura.

Abstract

Objective: To study the differences in respiratory responses to exercise in environmental conditions similar to the practice of winter sports among physically active and healthy men with and without spinal cord injury (SCI).

Methods: 24 healthy, physically active volunteers, 12 with SCI and the other 12 without SCI. Each subject performed three maximal exercise tests monitoring ventilatory parameters, but changing environmental circumstances: at sea level and 22 - 24 ° C, at 3,000 meters simulated high and 22 - 24 ° C, and at simulated 3,000 meters and 5 - 6 ° C.

Results: When comparing the values observed in simulated altitude tests regarding the level sea, there was a significant increase of the values of oxygen uptake and VCO₂ production. This increase was not accompanied by changes in ventilation, respiratory rate or tidal volume. In parallel, fractional exhaled O₂ and CO₂, the respiratory equivalent for O₂ and CO₂ and end-tidal O₂ and end-tidal CO₂ showed statistically significant changes.

Conclusions: In a simulated altitude of 3,000 meters, an intensive effort produce significant changes with higher oxygen demand that do not vary substantially with the cold.

Key words:

Spinal cord injury, exercise, hypoxia, cold, altitude.

Correspondencia

C. Javierre
Unidad de Fisiología. Departamento de Ciencias Fisiológicas II
Facultad de Medicina (Campus de Bellvitge)
Ctra. Feixa Llarga, s/n. 08907 L'Hospitalet de Llobregat. Barcelona. España.
e-mail: cjavierre@ub.edu

Introducción

La práctica deportiva de las personas que presentan una lesión medular (LM) ha aumentado, alcanzando, en algunos casos, un nivel competitivo alto, incluso en deportes que se desarrollan en condiciones medioambientales específicas, como la altura y el frío. La prevalencia de LM en Estados Unidos es de 250.000 personas y sigue aumentando por una mayor tasa de supervivencia [1], dado que el 40% de estos pacientes tienen ahora más de 45 años [2]. Los beneficios del ejercicio sobre la salud son bien conocidos [3][4], especialmente en programas de entrenamiento aeróbico [5-7]. En las personas con LM se ha señalado una adaptación cardiovascular y respiratoria a la actividad física diferente [8][9], con menor consumo de oxígeno máximo, sugiriendo que el pico máximo de consumo de oxígeno es menor cuanto más alta es la lesión [4][10-12]. Sin embargo, no hay información de la respuesta ventilatoria en condiciones ambientales específicas como las que se pueden dar en la práctica de actividades de invierno, deportiva o recreativa. Las diferencias en la adaptación al esfuerzo o en los parámetros máximos podrían producir diferencias importantes en los mecanismos adaptativos a corto plazo, durante la realización de la propia actividad.

El propósito de este estudio fue estudiar las diferencias en la adaptación respiratoria al ejercicio, entre personas con y sin LM, en reposo y durante la actividad, en condiciones medioambientales diferentes pero específicas de temperatura y de altura, similares a las de la práctica de los deportes de invierno.

Material y metodología

Participaron 24 voluntarios sanos y físicamente activos, 12 sujetos presentaban en su historia una lesión medular clínicamente estable (grupo de lesionados medulares, LM) y los otros 12 constituyeron nuestro grupo control o grupo de no lesionados medulares (control). La altura media del grupo LM fue de 1,79 (DE: 0,11) m., con un peso de 67,0 (DE: 9,7) kg. y una edad media de 31 (DE: 8) años. El grado de la lesión fue clasificada siguiendo la escala ASIA (American Spinal Injury Association) [13]: A 62%, B 23%, C 8% y D 8%.

La altura media del grupo no LM fue de 1,74 (DE: 0,07) m., con un peso de 77,3 (DE: 19,6) kg. y una edad media de 36 (DE: 10) años.

Todos los participantes habían realizado un mínimo de tres horas de actividad física semanales durante el último año. El grupo LM había completado su programa de rehabilitación hospitalaria y no se había producido ninguna complicación relevante en los tres meses previos a la participación en las pruebas. Todos los participantes, tras ser informados de la totalidad del protocolo, firmaron el consen-

timiento informado para su inclusión definitiva en el estudio. Las diferentes evaluaciones y recogidas de datos se realizaron de acuerdo al protocolo aprobado previamente por el Comité de Bioética de la Universidad de Barcelona.

Cada sujeto realizó tres pruebas de esfuerzo máximo con monitorización ventilatoria pero modificando las circunstancias ambientales: a nivel del mar y a una temperatura de 22 - 24° C; a 3.000 m. de altura simulada con una temperatura, también, de 22 - 24° C, y a 3.000 m. de altura simulada y una temperatura de 5 - 6° C. El orden de su realización fue aleatorizado para cada voluntario participante.

Las pruebas realizadas en altura simulada se realizaron en la cámara hipóxica hipobárica situada en el Campus de Bellvitge, de la Universidad de Barcelona.

Se realizó una prueba de esfuerzo progresiva máxima en ergómetro de brazos (Angio, Lode, Gröningen, Netherlands). La prueba empezaba con una carga inicial de 0 vatios, aumentando la resistencia en 10 w cada minuto hasta llegar a la máxima capacidad de esfuerzo. La cadencia fue mantenida entre 50 y 60 rev/min.

El intercambio de gases fue medido por un sistema de análisis de gases «respiración a respiración» (Metasys TR-plus, Brainware, La Vallette, Francia) equipado con un pneumotacógrafo y una máscara de doble vía (Hans Rudolph, Kansas, USA). Los parámetros recogidos fueron ventilación (VE, L·min⁻¹ BTPS), volumen corriente (VT, L·min⁻¹ BTPS), frecuencia respiratoria (FR, r·min⁻¹), consumo de oxígeno (VO₂, L·min⁻¹ STPD), consumo de oxígeno respecto al peso corporal (VO₂, mL·kg·min⁻¹ STPD), producción de CO₂ (VCO₂, L·min⁻¹ STPD), cociente respiratorio (QR), fracción espirada de O₂ (FeO₂%), fracción espirada de CO₂ (FeCO₂%), porcentaje de aprovechamiento de O₂ en el aire espirado (TRUEO₂%), equivalente respiratorio para el O₂ (ERO₂, L), equivalente respiratorio para el CO₂ (ERCO₂, L), presión de O₂ al final de la ventilación (PETO₂ mmHg) y presión de CO₂ al final de la ventilación (PETCO₂ mmHg).

Se determinó la distribución normal de la muestra mediante el test de Kolmogorov-Smirnov. El análisis de las diferencias en las medias observadas para las variables ventilatorias analizadas se realizó utilizando el test de la t de Student. El nivel de significación fue aceptado para p<0,05. El análisis estadístico se realizó usando el programa estadístico SPSS, versión 13.0 (SPSS Inc, Chicago, USA).

Resultados

No se observaron diferencias estadísticas respecto a la edad, peso y talla entre los dos grupos estudiados.

Al comparar los valores ventilatorios en reposo, a nivel del mar, tampoco se apreciaron diferencias entre el grupo

LM y el grupo control, excepto para el QR, más elevado estadísticamente en el grupo no LM (LM = $0,75 \pm 0,11$; control = $0,85 \pm 0,08$; $p=0,029$), FeCO_2 superior en el grupo control (LM = $3,1 \pm 0,5$; control = $3,7 \pm 0,4$; $p=0,002$), ERCO_2 menor en el grupo control (LM = $41,7 \pm 5,9$; control = $33,7 \pm 4,0$; $p=0,002$) y con diferencias en la PETCO_2 , siendo mayor significativamente la del grupo control (LM = $32,2 \pm 3,5$; control = $37,6 \pm 1,9$; $p=0,002$) (Tabla 1).

En la carga máxima alcanzada durante la prueba, no encontramos diferencias entre los dos grupos estudiados para ninguna de las tres pruebas realizadas. El comportamiento entre los grupos fue diferente. El grupo LM mostró un empeoramiento entre los valores observados a nivel del mar ($92,5 \pm 23,7$ w) y los observados en el ambiente simulado de 3.000 metros ($79,5 \pm 25,3$ w) ($p=0,01$) y con los de 3.000 metros con frío ($88,4 \pm 20,8$ w) ($p=0,04$). El grupo control no mostró diferencias estadísticamente significativas entre la carga máxima alcanzada a nivel del mar ($108,3 \pm 35,6$ w), los observados en el ambiente simulado de 3.000 metros ($96,3 \pm 34,9$ w) y los de 3.000 metros con frío ($94,1 \pm 32,9$ w), aunque existía una tendencia a una disminución en la carga máxima observada.

En el grupo LM, al comparar los valores observados en el reposo de la prueba de altura simulada a 3.000 metros respecto a la realizada a nivel del mar, se observó un aumento significativo de los valores del VO_2 ($p=0,006$), del VO_2/kg ($p=0,009$) y del VCO_2 ($p=0,005$). Este aumento, sin embargo, no se acompañó de modificaciones en el VE, la FR o el VT.

Paralelamente, la FeO_2 ($p=0,003$), la FeCO_2 ($p=0,002$), el TRUEO_2 ($p=0,007$), el ERO_2 ($p=0,007$), el ERCO_2 ($p=0,002$), la PETO_2 ($p<0,001$) y la PETCO_2 ($p<0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos (Tabla 1).

En el mismo grupo LM, al comparar los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros y un ambiente de temperatura controlada a 5 - 6° C con los observados en la realizada a nivel del mar se apreciaron cambios similares a los provocados con la exposición al ambiente simulado de 3.000 metros. Se observó un aumento significativo en el VO_2 ($p=0,006$), el VO_2/kg ($p=0,009$) y el VCO_2 ($p=0,005$). Este aumento, sin embargo, tampoco se acompañó de modificaciones en el VE, la FR o el VT. Paralelamente, la FeO_2 ($p<0,001$), la FeCO_2 ($p<0,001$), el TRUEO_2 ($p<0,001$), el ERO_2 ($p<0,001$), el ERCO_2 ($p<0,001$), la PETO_2 ($p<0,001$) y la PETCO_2 ($p<0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos. No se apreciaron diferencias estadísticamente significativas entre los valores observados en la prueba a 3.000 metros y 3.000 metros con frío (Figura 1).

En el grupo control, al comparar los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros con la realizada a nivel del mar, se observó un aumento significativo de los valores del VO_2 ($p=0,003$), del VO_2/kg ($p=0,001$) y del VCO_2 ($p=0,008$). Este aumento, sin embargo, no se acompañó de modificaciones en el VE, la FR o el VT. De forma paralela, la FeO_2 ($p<0,001$), la FeCO_2 ($p=0,004$), el TRUEO_2 ($p<0,001$), el ERO_2 ($p<0,001$), el ERCO_2

Tabla 1. Valores de las variables ventilatorias en las tres situaciones evaluadas para los dos grupos estudiados (grupo LM y control) durante el periodo de reposo previo a la prueba realizada.

Reposo	Grupo LM			Grupo control		
	0 m.	3.000 m.	3.000 m. y frío	0 m.	3.000 m.	3.000 m. y frío
FR (resp/min)	22,35,5	18,9±4,9	18,7±4,8	20,5±8,0	21,1±8,0	19,2±4,4
VEBTPS (L/min)	12,0±2,0	12,1±2,1	12,6±1,9	11,7±3,8	13,8±5,1	14,3±5,7
VT (L/min)	0,52±0,13	0,59±0,09	0,59±0,12	0,58±0,22	0,63±0,19	0,67±0,23
VO_2/kg (mL/kg/min)	6,3±1,3	8,5±2,1	9,1±1,9	5,4±2,1	9,1±1,5	10,7±4,5
VO_2 (L/min)	0,41±0,11	0,57±0,11	0,61±0,08	0,40±0,10	0,72±0,30	0,78±0,30
QR	0,75±0,11	0,82±0,05	0,82±0,05	0,85±0,08	0,82±0,06	0,84±0,06
VCO_2 (L/min)	0,30±0,06	0,46±0,08	0,49±0,06	0,34±0,10	0,59±0,23	0,65±0,24
FeO_2 (%)	17,0±0,7	15,2±1,1	15,1±0,6	16,6±0,6	14,6±0,7	14,3±0,8
FeCO_2 (%)	3,1±0,5	4,8±0,9	4,8±0,5	3,7±0,4	5,3±0,6	5,7±0,6
TRUEO_2 (%)	4,1±0,9	5,8±1,2	5,9±0,6	4,4±0,6	6,5±0,8	6,8±0,8
ERO_2 (L)	32,0±5,5	22,6±5,5	21,1±2,0	28,6±4,4	19,3±2,7	18,4±2,2
ERCO_2 (L)	41,7±5,9	27,6±5,6	25,9±2,7	33,7±4,0	23,7±3,1	21,9±2,7
PETO_2 (mmHg)	105,5±6,4	88,7±8,5	86,9±5,7	104,2±3,5	83,2±4,8	82,8±5,1
PETCO_2 (mmHg)	32,2±3,5	50,6±6,2	52,4±5,7	37,6±1,9	54,1±4,0	55,0±5,1

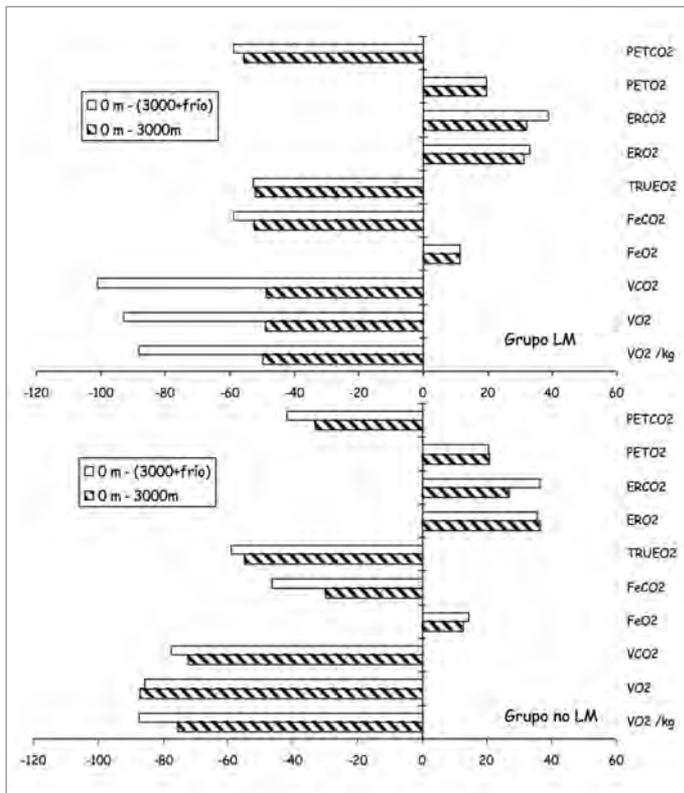


Fig. 1. Variables que ofrecieron diferencias estadísticamente significativas respecto a los valores observados a nivel del mar (0 metros) para los dos grupos evaluados (grupo LM y control) en el reposo previo a la realización de la prueba de esfuerzo.

($p=0,001$), la $PETO_2$ ($p<0,001$) y la $PETCO_2$ ($p=0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos (Tabla 1).

En el mismo grupo control, comparando los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros y un ambiente de temperatura controlada a 5 - 6° C con los observados en la realizada a nivel del mar se apreciaron cambios similares a los provocados con la exposición al ambiente simulado de 3.000 metros. Se observó un aumento significativo de los valores del VO_2 ($p=0,009$), del VO_2/kg ($p=0,007$) y del VCO_2 ($p=0,008$). Este aumento, sin embargo, tampoco se acompañó de modificaciones en el VE, la FR o el VT. Paralelamente, la FeO_2 ($p<0,001$), la $FeCO_2$ ($p<0,001$), el TRU_2EO_2 ($p<0,001$), el ERO_2 ($p<0,001$), el $ERCO_2$ ($p<0,001$), la $PETO_2$ ($p<0,001$) y la $PETCO_2$ ($p<0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos. Sin observarse diferencias estadísticamente significativas entre los valores observados en la prueba a 3.000 metros y 3.000 metros con frío (Figura 1).

Los cambios ventilatorios en los valores máximos de las tres pruebas en el grupo LM, al comparar los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros res-

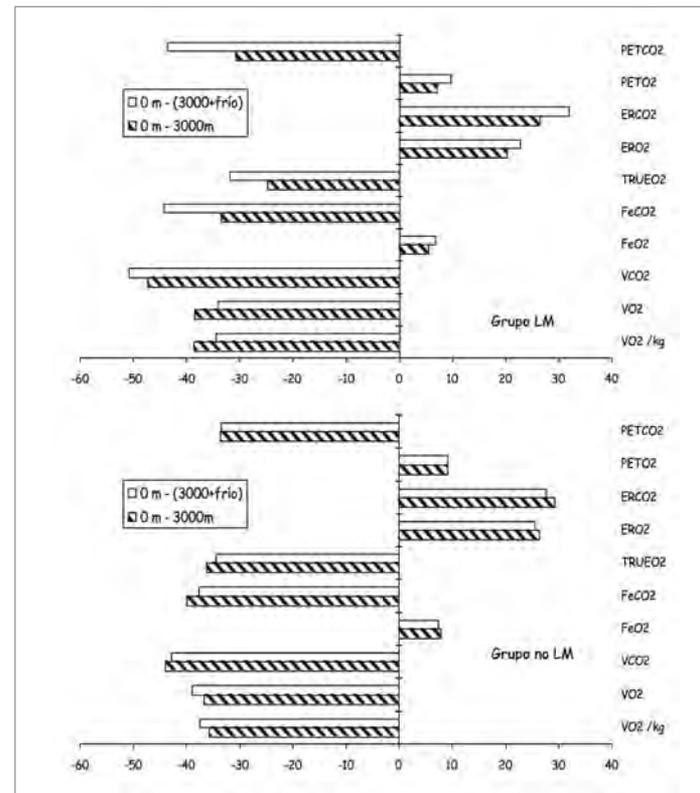


Fig. 2. Variables que ofrecieron diferencias estadísticamente significativas respecto a los valores observados a nivel del mar (0 metros) para los dos grupos evaluados (grupo LM y control) en los valores máximos durante la realización de la prueba de esfuerzo.

pecto a la realizada a nivel del mar, se observó un aumento significativo de los valores del VO_2 ($p<0,001$), del VO_2/kg ($p<0,001$) y del VCO_2 ($p<0,001$) (Fig.2). Este aumento, sin embargo, no se acompañó de modificaciones en VE, la FR o VT. Paralelamente, la FeO_2 ($p=0,002$), la $FeCO_2$ ($p<0,001$), el TRU_2EO_2 ($p=0,004$), el ERO_2 ($p=0,006$), el $ERCO_2$ ($p=0,002$), la $PETO_2$ ($p<0,001$), el cociente respiratorio (QR) ($p=0,02$) y la $PETCO_2$ ($p=0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos (Tabla 2).

En el mismo grupo LM, al comparar los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros y un ambiente de temperatura controlada a 5 - 6° C con los observados en la realizada a nivel del mar se apreciaron cambios similares a los provocados con la exposición al ambiente simulado de 3.000 metros. Se observó un aumento significativo de los valores del VO_2 ($p<0,001$), del VO_2/kg ($p<0,001$) y del VCO_2 del 50% ($p<0,001$). Este aumento, sin embargo, tampoco se acompañó de modificaciones en el VE, la FR o el VT. Paralelamente, la FeO_2 ($p=0,004$), la $FeCO_2$ ($p=0,002$), el TRU_2EO_2 ($p=0,008$), el ERO_2 ($p=0,01$), el $ERCO_2$ ($p=0,004$), la $PETO_2$ ($p=0,001$) y la $PETCO_2$

Tabla 2. Valores máximos de las variables ventilatorias en las tres situaciones evaluadas para los dos grupos estudiados (grupo LM y control) durante la prueba realizada.

Esfuerzo	Grupo LM			Grupo control		
	0 m	3.000 m	3.000 m y frío	0 m	3.000 m	3.000 m y frío
FR (resp/min)	43,3±17,9	42,3±18,6	42,4±16,7	34,1±8,1	36,2±11,6	35,9±10,0
VEBTPS (L/min)	62,4±24,6	65,2±24,9	70,4±27,2	72,1±27,9	70,8±30,2	69,6±21,7
VT (L/min)	1,36±0,31	1,43±0,27	1,44±0,26	1,91±0,57	1,83±0,68	1,70±0,52
VO ₂ /kg (mL/kg/min)	26,5±7,8	35,9±13,9	38,5±10,8	28,2±10,7	36,9±13,3	36,7±12,1
VO ₂ (L/min)	1,74±0,59	2,42±0,95	2,63±0,84	2,09±0,73	2,76±0,98	2,76±0,90
QR	1,07±0,08	1,10±0,17	1,12±0,05	1,08±0,06	1,11±0,09	1,12±0,10
VCO ₂ (L/min)	1,88±0,70	2,68±1,12	2,96±0,89	2,25±0,78	3,09±1,24	3,09±1,02
FeO ₂ (%)	17,4±0,5	16,2±0,6	16,4±0,7	17,2±0,3	15,8±0,5	15,9±0,4
FeCO ₂ (%)	3,7±0,7	5,0±0,5	5,3±0,7	3,9±0,3	5,4±0,4	5,4±0,5
TRUEO ₂ (%)	3,4±0,5	4,5±0,6	4,7±0,7	3,6±0,4	4,9±0,5	4,8±0,5
ERO ₂ (L)	35,8±5,4	27,0±3,5	26,3±4,0	34,2±3,1	25,1±2,7	25,5±2,6
ERCO ₂ (L)	33,6±5,9	24,6±2,5	23,3±3,2	31,7±2,8	22,6±1,4	22,8±2,6
PETO ₂ (mmHg)	114,7±4,6	104,4±5,0	102,7±7,3	111,2±5,0	100,2±5,2	100,4±3,8
PETCO ₂ (mmHg)	35,4±5,1	46,6±5,7	50,0±7,4	37,6±4,0	50,5±4,2	50,7±4,2

($p < 0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos. Sin observarse diferencias estadísticamente significativas entre los valores observados en la prueba a 3.000 metros y 3.000 metros con frío, excepto por una tendencia a una mayor PETCO₂ en los valores máximos observados en la prueba de 3.000 metros con frío ($p = 0,04$) (Figura 2).

En el grupo control, al comparar los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros respecto a la realizada a nivel del mar, se observó un aumento significativo de los valores del VO₂ ($p = 0,01$), VO₂/kg ($p = 0,01$) y del VCO₂ ($p = 0,02$). Este aumento, sin embargo, no se acompañó de modificaciones en el VE, la FR o el VT. Paralelamente, la FeO₂ ($p < 0,001$), la FeCO₂ ($p < 0,001$), el TRUEO₂ ($p < 0,001$), el ERO₂ ($p < 0,001$), el ERCO₂ ($p < 0,001$), la PETO₂ ($p < 0,001$) y la PETCO₂ ($p < 0,001$) mostraron cambios estadísticamente significativos (Tabla 2).

También en el grupo control, al comparar los valores observados en la prueba de altura simulada a 3.000 metros y un ambiente de temperatura controlada a 5 - 6° C con los observados en la realizada a nivel del mar se apreciaron cambios similares a los provocados con la exposición al ambiente simulado de 3.000 metros. Se observó un aumento significativo de los valores del VO₂ ($p = 0,008$), del VO₂/kg ($p = 0,007$) y del VCO₂ ($p = 0,002$). Paralelamente, la FeO₂ ($p < 0,001$), la FeCO₂ ($p < 0,001$), el TRUEO₂ ($p < 0,001$), el ERO₂ ($p < 0,001$), el ERCO₂ ($p < 0,001$), la PETO₂ ($p = 0,001$) y la PETCO₂ ($p < 0,001$) mostraron cambios

estadísticamente significativos. Sin observar diferencias entre los valores de la prueba a 3.000 metros y 3.000 metros con frío (Figura 2).

Discusión

En el presente estudio se ha observado un aumento en el consumo de oxígeno y la producción de CO₂ durante la exposición a un ambiente simulado de 3.000 m. de altura, a la temperatura ambiental y a la temperatura controlada de 5 - 6° C, tanto en reposo como en un esfuerzo máximo. El comportamiento de los dos grupos estudiados (LM y control) fue similar para estos cambios. Entre las limitaciones del estudio queremos reseñar que la evaluación se circunscribe a valores ventilatorios, por lo que no se han cuantificado cambios en otros aparatos o sistemas de nuestro organismo y, a pesar de que se intentó minimizar la variabilidad con muestras homogéneas, un experimento con una muestra superior podría añadir alguna diferencia.

En estudios previos se ha mostrado que los valores de VO₂ máximo resultaban ser menores en LM respecto al control [4][9][14][15], incluido un trabajo previo de nuestro grupo que ofrecía esas diferencias y las comenzaba a describir a partir del 50% de la carga máxima, tanto para el consumo de VO₂ como para la producción de VCO₂ [12]. En el presente estudio se puede observar esa cierta tendencia en los valores observados en la prueba a nivel del mar, pero no se aprecia cuando la prueba se desarrolla a 3.000 m. o a 3.000 m. con frío. La prueba realizada, con

ascenso de 10 w cada minuto, da unos ensayos con una duración de alrededor de 10 minutos, con un ascenso progresivo y rápido que podría disminuir esas diferencias observadas en otros trabajos. Por el contrario, esas posibles diferencias no se observan cuando la evaluación es en alguno de los dos ambientes controlados que se proponen en el presente estudio. Ello podría ser debido a la especificidad de las pruebas, permitiendo muy pocas contracciones musculares adicionales en el grupo control, o a que las pruebas sean máximas a nivel periférico, muscular, pero no a nivel cardiovascular, como sugieren los valores máximos alcanzados de QR, VO_2/kg , VE y la no diferente carga máxima alcanzada en las tres pruebas.

También se aprecia un importante aumento del consumo de O_2 y de la producción de CO_2 , tanto en reposo como en el esfuerzo máximo, sin que se aprecien modificaciones significativas en los valores de movilización global del volumen de aire, dado que no las hay para la VE, la FR o el VT. Esto hace que parámetros como el ERO_2 o el $ERCO_2$ sufran cambios importantes. Parece apreciarse una mejora en el aprovechamiento del aire respirado, siendo la mecánica ventilatoria más eficiente, quizás por un aumento del gasto cardiaco, que a esta altura podría ser capaz de compensar el menor contenido sanguíneo de O_2 .

Resulta difícil determinar la razón de este aumento en el consumo de O_2 para la misma carga. El hecho de que este cambio se observe ya en reposo hace pensar que se debe a un mayor trabajo de la musculatura ventilatoria para movilizar un determinado volumen de aire en un ambiente hipobárico, así como también al mayor trabajo cardiaco. Por lo tanto, este aumento del consumo de O_2 y de la producción de CO_2 se produciría en otros territorios que con las nuevas condiciones ambientales trabajan más y no sólo en los directamente implicados en el pedaleo con los brazos.

Las personas que practican deportes de invierno suelen vivir en alturas bajas y sólo cuando realizan la práctica deportiva suben y están sometidos a temperaturas como las propuestas en el estudio. Es por eso que no se valoran las posibles repercusiones a largo plazo y sí lo que ocurre como adaptación aguda ante una atmósfera hipóxica-hipobárica. En general, la respuesta ventilatoria a la hipoxia parece depender de los receptores periféricos al O_2 y, sobre todo, los del seno carotídeo. Estos quimiorreceptores se estimulan por la disminución de la presión parcial de oxígeno en sangre, induciendo la hiperventilación. Por lo tanto, esta respuesta se producirá cuando la presión arterial de oxígeno desciende, aproximadamente, por debajo de los 60 mmHg. Esta hiperventilación conllevaría la disminución de la presión parcial para el CO_2 debida a la hiperven-

tilación. En nuestro experimento, en la monitorización durante el reposo previo a la prueba de esfuerzo no se observa un aumento de la ventilación, sin modificaciones en la frecuencia respiratoria ni en el volumen corriente, ocurriendo esto en ambos grupos. Al mismo tiempo, se observa una disminución de la $PETO_2$ que es significativa pero con valores superiores a los 80 mmHg, lo que justifica la falta de actividad de los receptores del seno carotídeo. Esto viene corroborado por el aumento, también significativo, de la $PETCO_2$, que indica la no existencia de esa hiperventilación que hubiera provocado la disminución de la presión parcial de O_2 [16].

En los parámetros máximos analizados se observan cambios en el consumo de O_2 . Los aumentos superiores al 30% del consumo de O_2 no van acompañados de cambios parecidos en la ventilación, y todo ello para una carga similar o, incluso, ligeramente inferior en el caso del grupo LM. De nuevo, se observa un mejor aprovechamiento de los volúmenes de aire movilizados pero sin que parezca existir una disminución de la presión parcial de O_2 , dado que los valores de la $PETO_2$ son superiores a los observados durante el reposo.

Además, parece descartada la posibilidad de un *efecto Dempsey*, es decir, un intercambio gaseoso incompleto debido a la reducción del tiempo de circulación a través de los capilares pulmonares, que hubiera podido ser facilitado por el esfuerzo intenso y por haberlo desempeñado en un ambiente hipóxico-hipobárico. Vuelve a observarse una $PETCO_2$ más alta en el momento máximo del esfuerzo en las pruebas a 3.000 m. que la observada a nivel del mar, explicada por la inexistencia de la respuesta hiperventiladora.

Según Wasserman y col. [17], al realizarse una prueba de esfuerzo en cicloergómetro de brazos a una persona sana, sin entrenamiento específico de su tren superior, el VO_2 máximo alcanzado es entre el 50 al 70% del obtenido con un cicloergómetro de piernas. Pero, de acuerdo a los resultados observados en el presente estudio, habría que tener en cuenta las condiciones medioambientales y, de manera específica, la altura en la que se realice la exploración.

Al comparar los dos grupos estudiados no se constatan diferencias importantes en las adaptaciones observadas, por lo que parece que los LM no tendrían problemas añadidos por la lesión cuando se tienen que enfrentar a esfuerzos intensos en un medio como el estudiado en este protocolo.

La realización de un esfuerzo intenso produce importantes cambios ventilatorios, con necesidades de oxígeno superiores para una altura simulada de 3.000 metros. Estas diferencias son muy bien toleradas, no producen ninguna sintomatología diferente y no ofrecen diferencias depen-

dientes de la presencia de una lesión medular. Asimismo, la adición del frío al estímulo hipóxico también parece una sobrecarga asumible en las condiciones de este estudio. ■

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado parcialmente por FUNDACIÓN MAPFRE mediante una ayuda de la Convocatoria de Ayudas a la Investigación 2010.

Agradecemos a todas las personas que tomaron parte en el presente estudio por su excelente colaboración y a Silvana Mestre, coordinadora de los deportes de invierno del Comité Paraolímpico Internacional, por su apoyo continuado durante el desarrollo del presente protocolo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Jackson AB, Dijkers M, Devivo MJ, Poczatec RB. A demographic profile of new traumatic spinal cord injuries: change and stability over 30 years. *Arch Phys Med Rehabil* 2004; 85:1740-8.
2. Gerhart KA, Bergstrom E, Charlifue SW, Menter RR, Whitenack GG. Long-term spinal cord injury: functional changes over time. *Arch Phys Med Rehabil* 1993; 74:1030-4.
3. Campbell IG, Williams C, Lakomy HKA. Physiological responses of wheelchair athletes at percentages of tops speed. *Br J Sports Med* 1997; 31:36-40.
4. Keyser R, Rodgers M, Gardner E, Rusell P. Oxygen uptake during peak graded exercise and single-stage fatigue tests of wheelchair propulsion in manual wheelchair users and the able-bodied. *Arch Phys Med Rehabil* 1999; 80:1288-90.
5. Gass G, Camp E, Davis H, Eager D, Grout L. The effects of prolonged exercise on spinally injured subjects. *Med Sci Sports Exerc* 1981; 13:277-83.
6. Jackson RW. Sports for spinal paralysed person. *Paraplegia* 1987; 25:301-4.
7. Jehl JL, Gandmontagne G, Eyssette M. Cardiac output during exercise in paraplegic subjects. *Eur J Appl Physiol* 1991; 62: 256-60.
8. Davis GM. Exercise capacity following spinal cord injury. Sidney: University of Sidney 1991; 179-92.
9. Hounker M, Schmid A, Sorichter S, Schmidt Trucksäb A, Mrosek P, Keul J. Cardiovascular differences between sedentary and wheelchair trained subjects with paraplegia. *Med Sci Sports Exerc* 1998; 30:609-13.
10. Burkett LN, Chisum J, Stone W, Fernhall B. Exercise capacity of untrained spinal cord injured individuals and the relationship of peak oxygen uptake to level of injury. *Paraplegia* 1990; 28:512-21.
11. Javierre C, Vidal J, Segura R, Lizarraga MA, Medina J, Ventura JL. The effect of supplementation with n-3 fatty acids on the physical performance in subjects with spinal cord injury. *J Physiol Biochem* 2006; 62:271-9.
12. Vidal J, Javierre C, Lizarraga A, Segura JR, Barbany R, Pérez A. Physiological adaptations to exercise in people with spinal cord injury. *J Physiol Biochem* 2003; 59:11-8.
13. Ditunno JF, Young W, Donovan WH, Greasy G. The international standards booklet for neurological and functional classification of spinal cord injury. *Paraplegia* 1994; 32: 70-80.
14. Hjelnes N, Henriksson-Walberg H. Improved work capacity but unchanged peak oxygen uptake during primary rehabilitation in tetraplegic patients. *Spinal Cord* 1998; 36:691-8.
15. Secher NH, Ruberg Larsen N, Binhorst RA. Maximal oxygen uptake during arm cranking and combined arm plus leg exercise. *J Appl Physiol* 1974; 3:26-9.
16. Bisgard GE, Forster HV. Ventilatory responses to acute and chronic hypoxia. En: Fregly MJ, Blatteis CM, ed. *Handbook of Physiology. Environmental Physiology*. New York (NY): Oxford University Press, 1996: 1207-39.
17. Wasserman K. (ed.). *Principles of exercise testing & interpretation*. London Lippincott Williams & Wilkins 2000; 137: 153-5.

Conflicto de intereses

Los autores hemos recibido ayuda económica de FUNDACIÓN MAPFRE para la realización de este trabajo. No hemos firmado ningún acuerdo por el que vayamos a recibir beneficios u honorarios por parte de alguna entidad comercial o de FUNDACIÓN MAPFRE.