

Efecto del pedaleo de brazos sobre el sistema cardiorrespiratorio de las personas con tetraplejia

Effect of armcrank pedaling on the cardiorespiratory system of the people with tetraplegia

Gabriel Brizuela Costa
Sandra Sinz
Rafael Aranda Malavés
Ignacio Martínez Navarro
Universidad de Valencia

Resumen

Objetivos: Determinar el efecto de un programa de entrenamiento de pedaleo de brazos (PB) estacionario sobre el sistema cardiorrespiratorio de personas con tetraplejia. **Método:** Se estudiaron 11 participantes con tetraplejia por lesión medular (LM) de origen traumático a niveles entre C4 y C6. Se midieron variables espirométricas (VC, FVC y MVV) y de Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca VFC (HR, STDHR, RMSSD, LF, HF y HRVPOWER), antes y después de 8 semanas de entrenamiento. **Resultados:** Todas las variables mostraron cambios significativos ($p < 0,05$) después del programa de entrenamiento aumentando su valor, excepto la FC que disminuyó. Las personas con las LM más bajas mostraron valores mayores en todos los parámetros espirométricos. **Conclusiones:** Un entrenamiento de PB a corto plazo es suficiente para mejorar de modo relevante tanto los parámetros respiratorios como los de VFC, en personas con tetraplejia, incrementando probablemente su calidad de vida.

Palabras clave: pedaleo de brazos; tetraplejia; variabilidad de la frecuencia cardíaca; espirometría.

Abstract

Objective: The aim of the study was to determine the effect, in subjects with tetraplegia, of a stationary armcrank pedaling (AP) training program on their cardiorespiratory system. **Method:** 11 participants with tetraplegia, originated by traumatic spinal cord injury (SCI) at levels between C4 and C6, were included in the study. Spirometric (VC, FVC and MVV) and Heart Rate Variability (HRV) indexes (HR, STDHR, RMSSD, LF, HF, HRVPOWER) were measured before and after an 8 weeks of armcrank pedaling training program. **Results:** Spirometric and HRV variables showed changes ($p < 0.05$) after the training program, all the variables increased their value after the program, except HR which was decreased. People with lower SCI showed higher respiratory parameters. **Conclusions:** A short term AP training program is sufficient to meaningfully improve both respiratory and HRV parameters in people with high tetraplegia, and probably increasing their quality of life.

Key words: armcrank pedaling; tetraplegia; heart rate variability; spirometry.

Gabriel Brizuela Costa
Universidad de Valencia, España
E-mail: Gabriel.Brizuela@uv.es

Introducción

Las personas con lesión medular presentan una pérdida de su función motriz y una consiguiente reducción de su actividad física, lo cual lleva a un estilo de vida más sedentario y a una disminución de su capacidad física. Esta menor capacidad física lleva, a su vez, a una disminución de la actividad y la participación, con una posterior reducción de la capacidad física, cerrándose un círculo vicioso que resulta muy difícil de deshacer.

Las actividades diarias que son capaces de realizar estas personas no son lo suficientemente intensas como para mantener un estado físico saludable, derivando en un aumento del riesgo de padecer enfermedades respiratorias (Linn y cols., 2000) e **incrementando** su grado de mortalidad por accidente cardiovascular, si se les compara con el resto de la población sin LM (DeVivo, Black y Stover, 1993). En la última década, la enfermedad cardiovascular lideró las causas de mortalidad en las personas con LM crónica (Garshick y cols., 2005). Factores de riesgo como la hiperlipidemia, la obesidad y la diabetes son relativamente altos en esta población, debido a su estilo de vida sedentario y a su reducida función motriz (Washburn y Figoni, 1998; Jacobs y Nash, 2004).

Las personas con una LM alta sufren además la pérdida de función de mayor o menor parte de la musculatura respiratoria, lo cual disminuye los volúmenes y los flujos tanto a nivel pulmonar como bronquial. La capacidad vital (VC) puede ser reducida en aproximadamente un 50 % de los valores normales (**Forner, 1980; Rutchik y cols., 1988**), y la reducción de la fuerza y la habilidad para toser suele ser causa de acumulación de **secreción** → **secreciones** en las vías respiratorias (De Troyer y Estenne, 1991). Además, ha sido establecido desde una moderada (Rochester y Esau, 1994) hasta una gran reducción (Braun y cols., 1983; Serisier y cols., 1982) de la máxima ventilación voluntaria (MVV) en personas con problemas de tipo neuromuscular como la LM.

Afortunadamente es de **amplia** aceptación que las personas con LM pueden mejorar su salud cardiorrespiratoria, su capacidad de trabajo y su resistencia, mediante la práctica regular de ejercicio físico (**Noreau y Shephard, 1995; Crane y cols., 1994**). Myers y cols. (2007) concluyen, además, que el incremento de actividad física es un componente relevante en la reducción de la incidencia de enfermedades cardiovasculares en personas con LM. Se sabe con certeza que un incremento de la resistencia, en personas adultas con LM, mejora sus habilidades funcionales (Dalmeijer y Woude, 2001) e influye positivamente en su calidad de vida (Stevens y cols., 2008).

Las lesiones cervicales alcanzan el 50 % del total de LM (Go y cols., 1995) y desencadenan una tetraplejía que produce diferentes problemas funcionales, **reduciendo** la movilidad de las cuatro extremidades, **en función** del nivel y la severidad de la lesión, y de la habilidad funcional del individuo. La reducción tanto de la capacidad física como de las habilidades para determinadas tareas específicas, se convierten además en un serio obstáculo para su autonomía personal.

En este sentido, Bodin y cols. (2003), en un estudio llevado a cabo con 20 personas con tetraplejía, concluyó que mantener niveles más altos de actividad en la vida diaria (una vida más activa), puede contribuir a alcanzar parámetros respiratorios prácticamente normales. Sin embargo, las personas con tetraplejía tienen una oferta muy reducida de actividad física o deportes entre los cuales escoger para mantener una práctica regular.

Normalmente, si la lesión que origina la tetraplejía se localiza por debajo de C4 (vértebra cervical 4) la persona mantiene la función de los músculos deltoides y bíceps, siendo capaces,

al menos, de producir la abducción del hombro y la flexión del codo. El pedaleo con los brazos (PB) es un movimiento que prácticamente todas las personas con capacidad de flexión del codo podrían practicar. Pedaleando en modo asincrónico, gracias a que las bielas están unidas a través de su eje, incluso en ausencia de musculatura extensora del codo (tríceps), la extensión puede realizarse por medio de la acción de la musculatura flexora del codo contrario.

El ciclismo manual (con nombre original “handcycling”) está basado en el PB y es una modalidad de deporte Paralímpico desde los Juegos de Atenas 2004, cuando comenzó a modo de exhibición. En los últimos Juegos Paralímpicos (Beijing 2008) la competición de ciclismo manual incluyó entre sus eventos, además de las categorías para hombres y mujeres, las clases, A, B y C, correspondiendo la clase A, a personas con tetraplejia.

Si se compara con la propulsión por aros (lo convencional en las sillas de ruedas), el PB en una bicicleta (triciclo) de manos, es mucho más eficiente, menos estresante (Dallmeijer y cols., 2004) y debido a esto, preferido por los usuarios de sillas de ruedas para cubrir grandes distancias. Actualmente existen diferentes tipos de bicicletas de mano, unas basadas en cuadros rígidos y otras en unidades de pedaleo que se fijan a la propia silla de ruedas.

Existen además diferentes posiciones para dirigir una bicicleta de manos, desde una posición arrodillada, que requiere musculatura erectora del tronco, pasando por una posición sentada vertical, hasta una postura supina, casi totalmente horizontal y muy eficiente, desde punto de vista aerodinámico. La posición se establece normalmente en función tanto del nivel y grado de discapacidad del usuario, como de la importancia que le dé al rendimiento o al placer.

De hecho, el ciclismo de manos puede considerarse no únicamente un deporte de competición muy atractivo y una excelente forma de movilidad para uso en la vida diaria, sino además una actividad muy útil en los procesos de rehabilitación, especialmente para mejorar la resistencia y las habilidades funcionales de personas con muy baja capacidad física (Dalmejer y cols., 2004) y para mejorar o mantener niveles de condición física adecuados (ACSM, 1997; Noreau y Shephard, 1995), incluso en personas con tetraplejia (Valent, 2009). Para estas personas, el principal problema para poder practicar ciclismo de modo habitual, como un programa de actividad física, es que generalmente no pueden salir a pedalear solos sin ayuda externa. Se encuentran muchos problemas para montarse en la bicicleta, para salir de su casa, para girar en una curva muy cerrada, para subir cuestas, etc. Muchas veces, los familiares, amigos, compañeros o asistentes, no pueden correr o pedalear con ellos con la frecuencia que sería recomendable.

El PB estacionario, utilizando lo que se denomina normalmente bicicleta estática (en este caso adaptada al pedaleo de brazos), podría ser un tipo de ejercicio muy efectivo para mejorar el bienestar tanto físico como psicológico de las personas con LM (Hicks y cols., 2003), así como un buen modo de mejorar su salud cardiorrespiratoria (Hicks y cols., 2003). Este ejercicio estacionario podría ser un buen modo de comenzar a practicar el ciclismo, de comprobar la capacidad individual de pedaleo con los brazos, y de ir mejorando su habilidad y resistencia, antes de comenzar a pedalear por la carretera con una auténtica bicicleta de brazos, una actividad sensiblemente más dura.

Todos los argumentos hasta aquí expuestos hacen pensar que el ejercicio de PB estacionario asincrónico podría convertirse en una muy buena actividad física para las personas con tetraplejia alta que quieran mejorar su resistencia, sus habilidades funcionales y finalmente su salud, desde diferentes puntos de vista. El objetivo del presente estudio fue determinar el efecto de un programa de entrenamiento en PB estacionario sobre la función de sistema cardiorrespiratorio de personas con tetraplejia.

Método

Participantes

En el estudio participaron 11 personas (8 hombres y 3 mujeres), todos ellos con tetraplejia, originada por una LM de origen traumático y completa, ubicada entre los niveles C4 y C6. Con el objetivo de analizar un grupo homogéneo, con similares habilidades y nivel de actividad física habitual, los participantes fueron seleccionados de un grupo de 24 personas, excluyendo a aquellos que presentaran función de la musculatura extensora del codo o habilidad de pinza en sus manos (capacidad de coger objetos mediante la flexión de los dedos). También fueron excluidas las personas que practicaban algún tipo de deporte o actividad física de modo regular (al menos una vez a la semana), con el fin de completar una muestra de personas sedentarias.

Todos los participantes tenían los músculos bíceps y deltoides funcionales, aunque con diferentes niveles de fuerza y habilidad motriz. Podían flexionar voluntariamente sus codos, pero no extenderlos contra la acción de la gravedad u otra oposición. Ninguno de ellos poseía capacidad de pinza y únicamente dos de ellos utilizaban una silla manual de forma habitual, aunque sólo eran capaces de propulsarse a sí mismos durante distancias muy cortas, sobre superficies planas y utilizando la fuerza de la musculatura flexora de sus codos.

Todos los participantes fueron informados tanto de los posibles efectos beneficiosos como del riesgo que implicaba su participación en el estudio, y dieron su consentimiento escrito para formar parte del proyecto. El proyecto y sus protocolos fueron desarrollados conforme a los principios éticos de la Universidad de Valencia y el CIOMS (Council for International Organizations of Medical Sciences).

Variables

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, se definieron las siguientes variables:

Variables espirométricas:

- VC: Capacidad vital (l).
- FVC: Capacidad vital forzada (l).
- MVV: Máxima ventilación voluntaria (l).

Variables de variabilidad cardíaca:

- HR: Frecuencia cardíaca media (pulsaciones·min⁻¹).
- STDHR: Desviación estándar de la frecuencia cardíaca (pulsaciones·min⁻¹).
- RMSSD: Raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos (ms).
- LF: Potencia en el espectro de los componentes de bajas frecuencias (0,04 a 0,15 Hz) de los intervalos RR (ms²).
- HF: Potencia en el espectro de los componentes de alta frecuencia (0,15 a 0,4 Hz) de los intervalos RR (ms²).
- HRVPOWER: Varianza de los intervalos NN en el segmento temporal (ms²).
- LF/HF: Cociente LF (ms²) / HF (ms²).

Variables estadísticas:

- INJLEVEL: Factor que clasifica el nivel de la lesión en valor 0 o 1. El valor 1 incluye los niveles más altos de LM (lesiones C4 y C5), mientras que el nivel 0 incluye los niveles de LM más bajos (C6 y C7).
- TIME: Factor creado para definir el instante en que fueron hechas las mediciones. 0: Mediciones iniciales. 9: Mediciones realizadas durante la novena semana, tras completar el período de 8 semanas de entrenamiento.

El experimento

El estudio consistió en un programa de entrenamiento en PB, utilizando una bicicleta de “spinning” estacionaria adaptada, dentro del laboratorio. La bicicleta de brazos se construyó a partir de una bicicleta convencional de spinning, eliminando partes sobrantes como el asiento o el manillar, y añadiendo un par de empuñaduras especialmente diseñadas para personas con tetraplejía, y ajustables en diferentes modos a las características individuales de las manos y las muñecas de los participantes (Figura 1).



Figura 1: Bicicleta de brazos estacionaria, adaptada de una bicicleta convencional de spinning.

El entrenamiento fue llevado a cabo durante 8 semanas, en 2 sesiones semanales y nunca en días consecutivos. La duración del ejercicio fue de entre 15 y 20 minutos para las dos primeras semanas, hasta llegar a entre 30 y 40 minutos, a partir de la cuarta semana y hasta el final del programa, incrementando la duración de acuerdo a las posibilidades y el deseo de cada participante. Para cada uno de ellos, el objetivo de cada sesión era mantener una cadencia de PB constante (elegida libremente) hasta completar la sesión, y con una carga de trabajo (un freno mecánico) tal que, siendo la mayor posible, le permitiera concluir la sesión de entrenamiento de modo estable.

Este modo de ajustar la carga de entrenamiento simula la forma en que lo harían los participantes en sus propios hogares. El investigador fija el criterio de ajuste, tanto de la intensidad como de la duración de la sesión, aunque finalmente ambos parámetros son ajustados por el participante, en función de sus propias sensaciones.

Mediciones

La semana anterior al comienzo del programa de entrenamiento, todos los participantes fueron medidos por primera vez. Esta medición incluyó su peso, un registro de la FC latido a latido en reposo y las variables espirométricas. En la novena semana, **una semana después de finalizado el programa de ejercicio**, se volvió a realizar la medición completa, siguiendo el mismo orden y cuidando de tomar el registro de la frecuencia cardíaca a la misma hora del día que la primera sesión.

Medición de las variables de Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca

El análisis de la variabilidad de la frecuencia cardíaca (VFC) se utiliza normalmente como un método no invasivo para cuantificar el control que el sistema nervioso autónomo ejerce sobre la dinámica de la frecuencia cardíaca (Akselrod y cols., 1981; Task Force, 1996), y puede utilizarse para la predicción del riesgo de morbilidad y mortalidad en personas con LM (Ditor y cols., 2005a; Millar y cols., 2009).

En el presente estudio, se **registró** la señal de frecuencia cardíaca latido a latido en reposo de cada participante durante 10 minutos, sentado en su propia silla de ruedas, en condiciones estandarizadas de baja luminosidad y con la temperatura ambiental a 22 °C. Asimismo, se cuidó que las mediciones se hicieran con la vejiga lo más vacía posible y que el participante no tuviera ningún elemento que le pudiera presionar o comprimir, para evitar una respuesta de disreflexia autonómica que pudiese afectar a la respuesta cardíaca.

Para almacenar la señal de FC se utilizó un cardiotacómetro Polar RS800 (Polar Electro, Finland) ajustado en el modo RR (latido a latido). Los registros se volcaron a un ordenador a través de una interfase por infrarrojos (Polar IR) mediante la aplicación Polar Precision Performance (versión 3).

Todos los parámetros de VFC fueron calculados con la aplicación Kubios HRV 2.0, analizando únicamente los últimos cinco minutos del registro, con objeto de asegurar la estabilidad de la señal cardíaca. Tras el filtrado y la corrección de los datos, de acuerdo a las recomendaciones de Tarvainen (2002), se realizó un análisis espectral utilizando como algoritmo la “transformada rápida de Fourier” (FFT) y fijando las bandas de frecuencia de acuerdo a las directrices más ampliamente aceptadas (Task Force, 1996): alta frecuencia (HF) de 0,15 a 0,4 Hz y baja frecuencia (LF) de 0,04 a 0,15 Hz.

Medición de las variables de espirometría

Todas las variables de espirometría se midieron utilizando un espirómetro Fukuda Sangyo ST-250 (Fukuda Sangyo Inc., Japan). El mismo técnico se ocupó de la calibración diaria y de realizar los test a los participantes en posición de sentado, sobre sus propias sillas de ruedas. La reproducibilidad de la técnica es la establecida por Miller y cols. (2005).

Para medir VC, FVC y MVV, se explicó el procedimiento a los participantes, se les aflojaron todos los cinturones o fajas que pudieran llevar y se les colocó una pinza de nariz. Para la medición de VC todos los participantes fueron motivados para inhalar completamente y exhalar al máximo posible, sosteniendo el esfuerzo al menos durante 6 s. Para medir FVC se

dio la instrucción de inhalar completamente y “echar fuertemente” todo el aire, manteniendo también el esfuerzo durante al menos 6 s. La medición de VC y FVC se repitió tres veces (Miller y cols., 2005), con un coeficiente de variación individual del 3 % para ambas variables.

Para medir MVV, las instrucciones fueron realizar al menos tres respiraciones normales, seguidas de tantas respiraciones rápidas y profundas como fuera posible durante 12 s. Esta valoración se realizó una única vez a cada participante (en cada sesión).

Análisis estadístico

Se llevó a cabo un ANOVA para las variables VC, FVC, MVV; HR; STDHR; RMSSD; LF; HF; HRVPOWER; LF/HF, incluyendo las variables TIME e INJLEVEL como factores. Se fijó un nivel de significación Alfa de 0,05 y se utilizó un test *post hoc* de rango múltiple LSD, para determinar diferencias significativas entre los niveles de los factores.

Para cada variable se estudió la normalidad de la distribución utilizando el test de Kolmogorov-Smirnov. Cuando se detectaron datos sesgados o heteroscedásticos (como para LF; HF; HRVPOWER) fueron transformados obteniendo su logaritmo natural, lo que permite una comparación estadística paramétrica, ya que presenta una distribución normal (La Fontaine y cols., 2010). Sin embargo, los resultados de estas variables son expresados en la forma original, con el fin de facilitar su comparación con otros estudios.

Resultados

Diferencias en el factor TIME: Antes y después

Las variables VC, FVC, MVV, STDHR, RMSSD, LF, HF, HRVPOWER y LF/HF mostraron diferencias (TRM LSD) para el factor TIME, entre los niveles “Antes” y “Después”. Para todas estas variables, los valores medidos “Después” resultaron significativamente mayores que los medidos “Antes” del programa de 8 semanas de entrenamiento en PB.

Por el contrario, para la variable HR, los valores medidos “Antes” resultaron significativamente mayores (TRM LSD) que los medidos “Después” del programa de entrenamiento (Tabla 1)

Tabla 1: Resultados para las variables espirométricas y de VFC, según el factor TIME (“Antes” o “Después”).

Variable		Factor TIME				
		Antes	Después	Diferencia		
Nombre	Unidades	Semana 0 ^a	Semana 9 ^a	(%)	p	TRM
VC	(l)	2.74 ± 0.25	2.83 ± 0.25	3	0,7917	+
FVC	(l)	2.68 ± 0.22	2.74 ± 0.22	2	0,8378	+
MVV	(l)	81.16 ± 8.01	85.88 ± 8.01	6	0,6822	+
HR	(puls·min ⁻¹)	72.88 ± 2.45	70.74 ± 2.45	- 3	0,5436	+
STDHR	(puls·min ⁻¹)	2.06 ± 0.19	2.41 ± 0.19	17	0,2039	+
RMSSD	(ms)	17.95 ± 6.07	25.06 ± 6.07	40	0,4180	+
LF	(ms ⁻²)	193.63 ± 76.32	369.28 ± 76.32	91	0.0722	+
HF	(ms ⁻²)	165.28 ± 219.63	414.39 ± 219.63	151	0,4113	+
HRVPOWER	(ms ⁻²)	404.88 ± 251.67	861.22 ± 251.67	112	0,0943	+
LF/HF		2.47 ± 0.61	3.23 ± 0.61	31	0,3904	+
TRM ” + “ expresa diferencias estadísticamente significativas en el Test de Rango Múltiple LSD.						

Diferencias en el factor INJLEVEL: Nivel de la lesión

Se detectaron diferencias ($p < 0,05$ y TRM LSD) para las variables VC y FVC entre los niveles “Alto” y “Bajo” del factor INJLEVEL. Para estas variables, los valores medidos a los participantes con las lesiones de nivel más bajo, resultaron significativamente mayores que para los participantes con lesiones más altas.

Del mismo modo, la variable RMSSD también mostró diferencias ($p < 0,05$ y TRM LSD) entre los niveles del factor INJLEVEL. En este caso, los valores medidos a los participantes con lesiones a niveles inferiores, fueron significativamente menores que para los participantes con lesiones a niveles más altos (Tabla 2).

Tabla 2: Resultados para las variables espirométricas y de VFC, según el factor INJLEVEL (nivel de LM “alto” o “bajo”).

Variable		Factor INJLEVEL				
		Alto	Bajo	Diferencia		
Nombre	Unidades	(C4 - C5)	(C6 - C7)	(%)	p	TRM
VC	(l)	2.45 ± 0.16	3.01 ± 0.17	23	0,0104	+
FVC	(l)	2.32 ± 0.14	3.1 ± 0.15	34	0,0004	+
MVV	(l)	74.63 ± 5.19	89.42 ± 5.68	20	0,0615	
HR	(puls·min ⁻¹)	74.74 ± 2.43	70.77 ± 2.67	- 5	0,2795	
STDHR	(puls·min ⁻¹)	2.20 ± 0.16	2.18 ± 0.17	- 1	0,9243	
RMSSD	(ms)	21.26 ± 4.25	17.71 ± 4.66	-17	0,0030	+
LF	(ms ⁻²)	279.97 ± 66.05	239.96 ± 72.35	- 14	0,6364	
HF	(ms ⁻²)	317.30 ± 140.27	128.01 ± 153.66	- 60	0,8440	
HRVPOWER	(ms ⁻²)	644.33 ± 178.91	448.06 ± 195.99	- 30	0,4651	
LF/HF		2.79 ± 0.48	3.28 ± 0.53	18	0,4990	
TRM ” + “ expresa diferencias estadísticamente significativas en el Test de Rango Múltiple LSD.						

Interacción entre los factores

No se detectó interacción entre los factores TIME e INJLEVEL, para ninguna de las variables analizadas.

Discusión

De acuerdo a los resultados obtenidos puede concluirse que el entrenamiento en pedaleo de brazos, realizado por personas con tetraplejia, tiene un efecto positivo tanto sobre su sistema respiratorio como su sistema cardiovascular.

Efecto del ejercicio sobre el sistema respiratorio

Evidentemente, y al igual que para otras variables, VC y FVC mostraron diferencias importantes entre los dos niveles de LM, debiéndose básicamente al diferente nivel de función de la musculatura implicada en la respiración. Estos resultados permitirían concluir que las personas con LM cervicales más bajas tendrían volúmenes y capacidades pulmonares mayores que las personas con LM más altas.

Paralelamente, los resultados del análisis espirométrico permiten concluir que existe un pequeño, aunque significativo incremento de VC y FVC, después del periodo de entrenamiento en PB y debido muy probablemente a un incremento general de la función de la musculatura implicada en la función respiratoria. Esto se apoya además, en un incremento de MVV, variable que diversos autores (Rochester y Esau, 1994; Braun y cols., 1983; Serisier y cols., 1982) han detectado disminuida, cuando existen problemas neuromusculares, añadiendo que, para conocer con mayor profundidad la función de la musculatura respiratoria, sería necesario añadir la medición de las presiones inspiratorias y expiratorias, las cuales presentan variaciones importantes y podrían mostrar mayores diferencias después de un periodo de entrenamiento.

Estos resultados coinciden con los presentados por Crane y cols. (1994) quien demostró incrementos en FVC en personas con tetraplejia, aunque resultan contrarios a las conclusiones de Valent y cols. (2009), quien no detectó incrementos en FVC. Esta diferencia con Valent y cols. (2009) puede deberse a que en su estudio los participantes entrenaban utilizando un sistema de “acople de bicicleta” (una unidad de pedaleo que se fija a la propia silla de ruedas), lo cual implica una carga de tal magnitud que no podía ser mantenida por los participantes durante más de 7 minutos. Por el contrario, nuestro estudio fue llevado a cabo utilizando una bicicleta de PB estacionaria, ajustable desde una mínima carga de trabajo con el fin de asegurar la continuidad de un ejercicio aeróbico, durante periodos relativamente largos.

Efecto del ejercicio sobre la regulación neural del sistema cardiovascular

Existen pocos estudios que hayan investigado los efectos de programas de ejercicio físico sobre la VFC en personas con LM, y además los resultados que arrojan son contradictorios. En un estudio de marcha asistida sobre tapiz rodante (BWSTT), realizado durante de 6 meses, en 3 sesiones semanales, se encontró una reducción significativa del cociente LF/HF, consecuencia de una disminución significativa de la potencia en LF y un incremento no significativo de la potencia en HF (Ditor y cols. 2005a). Por el contrario, un estudio similar de entrenamiento en BWSTT, de 4 meses de duración, no encontró cambios en ningún índice de VFC (Ditor y cols. 2005b). Más recientemente, Millar y cols. (2009) evaluaron los efectos de 1 mes de 3 sesiones semanales de entrenamiento ortoestático (HUTT) comparativamente con un entrenamiento basado en BWSTT. Sus resultados muestran que solo el entrenamiento basado en BWSTT fue capaz de mejorar significativamente la VFC, y que dicha mejora únicamente apareció cuando se utilizaron métodos de análisis no lineal, como medidas de entropía y correlación fractal.

Nuestro estudio presenta la particularidad de ser el primero en medir el efecto de un entrenamiento en PB a corto plazo sobre la VFC, siendo nuestro mayor hallazgo que 8 semanas de entrenamiento en PB son suficientes para mejorar significativamente la VFC en personas con tetraplejia, tanto en sus índices temporales (STDHR, RMSSD) como en aquellos derivados del dominio espectral (VFCPOWER, LF y HF).

Nuestros resultados difieren en parte con los aportados por los autores mencionados anteriormente. La diferencia con el estudio de Millar y cols. (2009) podría deberse al hecho de que todos nuestros participantes tenían una LM cervical entre C4 y C6, mientras su muestra era más heterogénea, incluyendo personas con LM entre C5 y T10. Si a esta diferencia en la selección de la muestra se añade que nuestro programa de entrenamiento fue más largo (16 en lugar de 12 sesiones de entrenamiento), puede explicarse por qué Millar y cols. no encontraron diferencias significativas en ningún índice lineal de VFC y nosotros sí. Del mismo modo, en el estudio de Ditor y cols. (2005b), la reducida y heterogénea muestra (6 participantes con LM entre C4 y T12) podría haber sido la causa de no obtener cambios significativos en las mediciones de la VFC.

Resulta interesante que nuestros resultados muestran un incremento concomitante de la potencia espectral en LF y HF, mientras que estudios previos muestran unánimemente una reducción de la potencia en LF después de diferentes programas de actividad física (Ditor y cols. 2005a; Ditor y cols. 2005b; Millar y cols. 2009). Si estuviéramos trabajando con personas sin LM, este incremento en la potencia en LF unido a un aumento del cociente LF/HF, se explicaría generalmente por un aumento de la actividad de la rama simpática (Task Force, 1996). Sin embargo, debido a que las personas con tetraplejía están privadas de inervación simpática eferente hacia el sistema cardiovascular (Bunten y cols. 1998; Grimm y cols. 1997), se ha sugerido recientemente que los cambios en los componentes de baja frecuencia (LF) de la VFC podrían estar también regulados por la rama parasimpática en esta población (Takahashi y cols. 2007). De acuerdo a esta teoría, nuestro incremento en LF y HF se debería en ambos casos a una mejora en la modulación vagal de la dinámica de la FC. En cualquier caso, el mayor cambio pre-post en HF comparativamente con LF (151 % frente a 91 %) nos sugiere que también en las personas con tetraplejía la primera tiene mayor dependencia de la rama parasimpática que la segunda.

En definitiva, el presente estudio muestra claramente dos grandes hallazgos en relación con la regulación neural del sistema cardiovascular. Por una parte, relacionado con la “entrenabilidad” de la VFC, queda demostrado que incluso las personas con altas LM cervicales (C4 a C6) mantienen la habilidad de producir adaptaciones positivas en su regulación cardíaca autónoma. Por otra parte, el entrenamiento en PB a corto plazo podría ser una terapia eficaz para reducir la mortalidad en personas con LM, en la medida en que produce un incremento en la modulación vagal de la dinámica de la FC, efecto que ha sido asociado en numerosos estudios con un mayor nivel de salud (Dekker y cols., 1997; Kleiger y cols., 2005; Task Force, 1996; Tsuji y cols., 1996).

Recomendaciones a posibles usuarios

El entrenamiento en PB estacionario es un método seguro para practicar ejercicio aeróbico saludable de forma habitual, podría ser especialmente recomendable para personas con tetraplejía y con una baja capacidad física, y ser fácilmente ajustado a medida que el individuo va mejorando su condición física.

Los principiantes, las personas con la capacidad física más reducida y los participantes más vulnerables deberían ser supervisados por profesionales formados, quienes deberían controlar y ajustar cuidadosamente las cargas (volumen e intensidad de trabajo) a las capacidades individuales de cada persona.

Finalmente, debe ser tenido en consideración que este tipo de ejercicio puede convertirse en el primer paso hacia la utilización de bicicletas de mano reales, como una alternativa muy eficiente tanto para el desplazamiento diario como para el disfrute del tiempo de ocio, con familiares o amigos, ofreciendo como recompensa una buena cuota de independencia.

Limitaciones y futuras líneas de trabajo

Es necesario profundizar en el efecto a largo plazo de este tipo de ejercicio, debido a que existe muy poca información, y es necesario alcanzar conclusiones que permitan hacer recomendaciones, con el fin de evitar problemas por sobrecarga muscular, osteoarticular, fisiológica, etc.

Del mismo modo, es necesario desarrollar estudios similares con una muestra mayor de personas con tetraplejía, dirigidos a analizar el efecto de este tipo de ejercicio en un espectro mayor de esta población, asegurándose de no dejar al margen posibles subgrupos dentro del

colectivo y obteniendo conclusiones por edad, edad de la LM, género y otras características clasificables.

El siguiente paso sería el estudio del efecto del entrenamiento en PB sobre la fuerza muscular y sobre la habilidad para realizar actividades básicas de la vida diaria. A modo de simple ilustración, una parte de los participantes manifestaron que a medida que transcurrían las semanas de entrenamiento eran capaces de realizar de modo más eficiente algunas actividades, e incluso recuperar algunas otras que no habían podido llevar a cabo desde que presentaban la LM. Como destacan algunos autores, (Dalmeijer y Woude, 2001; Dalmeijer y cols., 2004), un incremento en la potencia de pedaleo de brazos en personas con tetraplejía, podría relacionarse muy probablemente con una mejora en su funcionalidad y un incremento en su autonomía personal.

Agradecimientos

Este proyecto fue llevado a cabo en el laboratorio de Biomecánica de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte de la Universidad de Valencia, en cooperación con ASPAYM CV (Asociación de lesionados medulares y grandes disminuidos físicos de la Comunidad Valenciana). Los autores reconocen el apoyo recibido de las mencionadas entidades y agradecen muy especialmente el asesoramiento de la Unidad de Lesionados Medulares del Hospital La Fe, de Valencia, y en especial a los doctores Delgado, Miguel y Giner.

Referencias

- ACSM (1997). *Exercise management for persons with chronic diseases and disabilities*. Champaign IL: Human Kinetics.
- Akselrod, S.; Gordon, D.; Ubel, F.A.; Shannon, D.C.; Berger, A.C.; Cohen, R.J. (1981). Power spectrum analysis of heart rate fluctuation: a quantitative probe of beat-to-beat cardiovascular control. *Science*. 213: 220–222.
- Bodin, P.; Kreuter, M.; Bake, B.; Fagevik Olsén, M. (2003). Breathing patterns during breathing exercises in persons with tetraplegia. *Spinal Cord*. 41, 290–295.
- Braun, N.M.; Arora, N.S.; Rochester, D.F. (1983). Respiratory muscle and pulmonary function in polymyositis and other proximal myopathies. *Thorax*. 38, 8: 616–623.
- Bunten, D.C.; Warner, A.L.; Brunnemann, S.R.; Segal, J.L. (1998). Heart rate variability is altered following spinal cord injury. *Clin Auton Res*. 8: 329–334.
- Crane, L.; Klerk, K.; Ruhl, A.; Warner, P.; Ruhl, C.; Roach, K.E. (1994). The effect of exercise training on pulmonary function in persons with quadriplegia. *Paraplegia*. 32: 435–441.
- Dalmeijer, A.J.; Zentgraaff, I.D.B.; Zijp, N.I.; Van der Woude, L.H.V. (2004). Submaximal physical strain and peak performance in handcycling versus handrim wheelchair propulsion. *Spinal Cord*. 42: 91–98.
- De Troyer, A.; Estenne, M. (1991). Review article: The expiratory muscles in tetraplegia. *Paraplegia*. 29: 359–363.
- Dekker, J.M.; Schouten, E.G.; Klootwijk, P.; Pool, J.; Swenne, C.A.; Kromhout, D. (1997). Heart rate variability from short electrocardiographic recordings predicts mortality from all causes in middle-aged and elderly men. The Zutphen Study. *Am J Epidemiol*. 145: 899–908.
- Ditor, D.S.; Kamath, M.V.; MacDonald, M.J.; Bugaresti, J.; McCartney, N.; Hicks, A.L. (2005a). Reproducibility of heart rate variability and blood pressure variability in individuals with spinal cord injury. *Clin Auton Res*. 15: 387–393.

- Ditor, D.S.; Macdonald, M.J.; Kamath, M.V.; Bugaresti, J.; Adams, M.; McCartney, N.; Hicks, A.L. (2005b). The effects of body-weight supported treadmill training on cardiovascular regulation in individuals with motor-complete SCI. *Spinal Cord*. 43: 664-673.
- Forner, J.V. (1980). Lung volumes and mechanics of breathing in tetraplegics. *Paraplegia*. 8: 258-266.
- Garshick, E.; Kelley, A.; Cohen, S.A.; Garrison, A.; Tun, C.G.; Gagnon, D.; Brown, R. (2005). A prospective assessment of mortality in chronic spinal cord injury. *Spinal Cord*. 43: 408-416.
- Go, B.; De Vivo, M.; Richards, J. (1995). The epidemiology of spinal cord injury. In: Stover, S.; DeLisa, J.; Whiteneck, G. (eds.). *Spinal Cord Injury: Clinical Outcomes from the Model Systems*. Aspen: Gaithersburg, M.D.: 21-55.
- Grimm, D.R.; De Meersman, R.E.; Almenoff, P.L.; Spungen, A.M.; Bauman, W.A. (1997). Sympathovagal balance of the heart in subjects with spinal cord injury. *Am. J. Physiol*. 272: 835-842.
- Hicks, A. L.; Martin, K. A.; Ditor, D. S.; Latimer, A. E.; Craven, C.; Bugaresti, J.; McCartney, N. (2003). Long-term exercise training in persons with spinal cord injury: Effects on strength, arm ergometry performance and psychological well-being. *Spinal Cord*. 41: 34-43.
- Jacobs, P.L.; Nash, M.S. (2004). Exercise recommendations for individuals with spinal cord injury. *Sports Med*. 34: 727-751.
- Kleiger, R.E.; Stein, P.K.; Bigger, J.T. Jr. (2005). Heart rate variability: measurement and clinical utility. *Ann. Noninvasive Electrocardiol*. 10: 88-101.
- La Fontaine, M.F. ; Wecht, J.M. ; Spungen, A.M. ; Bauman, W.A. (2010). Intra-inter visit reproducibility of short-term linear and nonlinear measurement of heart rate variability in tetraplegia and neurologically intact controls. *Physiological Measurement*. 31: 363-374.
- Linn, W.S.; Adkins, R.H.; Gong, H.; Waters, R.L. (2000). Pulmonary function in chronic spinal cord injury: A cross-sectional survey of 222 Southern California adult outpatients. *Arch Phys Med Rehabil*. 81: 757-763.
- Millar, P.J.; Rakobowchuk, M.; Adams, M.M.; Hicks, A.L.; McCartney, N.; MacDonald, M.J. (2009). Effects of short-term training on heart rate dynamics in individuals with spinal cord injury. *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*. 150: 116-121.
- Miller, M. R.; Hankinson, J.; Brusasco, V.; Burgos, F.; Casaburi, R.; Coates, A.; Crapo, R.; Enright, P.; Van der Grinten, C. P. M.; Gustafsson, P.; Jensen, R.; Johnson, D. C.; MacIntyre, N.; McKay, R.; Navajas, D.; Pedersen, O. F.; Pellegrino, R.; Viegi, G.; Wanger, J. (2005). Standardisation of spirometry. *Eur Respir J*. 26: 319-338.
- Myers, J.; Lee, M.; Kiratli, J. (2007). Cardiovascular disease in spinal cord injury: An overview of prevalence, risk, evaluation, and management. *Amer. J. Phys. Med. Rehabil*. 86: 142-152.
- Noreau, L.; Shephard, R.J. (1995). Spinal cord injury, exercise and quality of life. *Sports Medicine*. 20: 226-250.
- Rochester, D.F.; Esau, S.A. (1994). Assessment of ventilatory function in patients with neuromuscular disease. *Clin Chest Med*. 15, 4: 751-63.
- Rutchik, A.; Weissman, A.R.; Almenoff, P.L.; Spungen, A.M.; Bauman, W.A.; Grimm, D.R. (1988). Resistive inspiratory muscle training in subjects with chronic cervical spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*. 79: 293-297.

- Serisier, D.E.; Mastaglia, F.L.; Gibson, G.J. (1982). Respiratory muscle function and ventilatory control. I in patients with motor neurone disease. II in patients with myotonic dystrophy. *Q J Med.* 51, 202: 205-226.
- Stevens, S.L.; Caputo, J.L.; Fuller, D.K.; Morgan, D.W. (2008). *Journal of Spinal Cord Medicine.* 31, 4: 373-378.
- Takahashi, M.; Matsukawa, K.; Nakamoto, T.; Tsuchimochi, H.; Sakaguchi, A.; Kawaguchi, K.; Onari, K. (2007). Control of heart rate variability by cardiac parasympathetic nerve activity during voluntary static exercise in humans with tetraplegia. *Journal of Applied Physiology.* 103: 1669-1677.
- Tarvainen, M.P.; Ranta-aho, P.O.; Karjalainen, P.A. (2002). An advanced detrending method with application to HRV analysis. *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 49: 172-175.
- Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology (1996). Heart rate variability: Standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. *European Heart Journal.* 17: 354-381.
- Tsuji, H.; Larson, M.G.; Venditti, F.J. Jr.; Manders, E.S.; Evans, J.C.; Feldman, C.L.; Levy, D. (1996). Impact of reduced heart rate variability on risk for cardiac events. The Framingham Heart Study. *Circulation.* 94: 2850-2855.
- Valent, L.; Dallmeijer, A.; Houdijk, H.; Slootman, H.; Janssen, T.; Post, M.; van der Woude, L. (2009). Effect of hand cycle training on physical capacity in individuals with tetraplegia: A clinical trial. *Physical Therapy.* 89, 10: 1051-1060.
- Washburn, R.A.; Figoni, S.F. (1998). Physical activity and chronic cardiovascular disease prevention in spinal cord injury: a comprehensive literature review. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 3: 16-32.