

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA



**Máster Universitario en Investigación e Intervención en
Ciencias de la Actividad Física y el Deporte**

Departamento de Educación Física y Deportiva

Facultat de Ciències de l'Activitat Física i l'Esport

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN:

**EFFECTO INMEDIATO DEL EJERCICIO SOBRE LA
VARIABILIDAD DE LA FRECUENCIA CARDÍACA EN
PERSONAS CON TETRAPLEJIA**

Presentado por:

José Luis Romero Ávila

Tutor-Director:

Dr. Gabriel Brizuela Costa

Valencia, Septiembre de 2011

AGRADECIMIENTOS

A Gabi, por todo su apoyo, su ayuda, sus ánimos... que han sido fundamentales para realizar este proyecto. Y sobre todo por ser la persona que es.

Muchas gracias Gabi.

A Nacho, por toda su colaboración, ayuda y aportación de conocimientos.

A mi familia por estar siempre ahí y sobre todo a mi madre, por todo su cariño.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Lesión Medular.....	9
1.2. Tetraplejia	9
1.3. Alteraciones cardiovasculares en personas con LM	10
1.4. Ejercicio físico en personas con LM.....	13
1.4.1. Valoración del ejercicio cardiorrespiratorio en personas con LM..	15
1.4.2. Adaptaciones fisiológicas al ejercicio en personas con LM	16
1.4.3. Beneficios de la Actividad Física en personas con LM.....	17
1.5. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca.....	18
1.5.1. Medición de la VFC	20
1.5.2. Análisis de la VFC	20
1.5.3. La VFC durante el reposo, el ejercicio y la recuperación.....	24
1.6. VFC en personas con lesión medular	26
1.7. Objetivos e hipótesis	27
2. MATERIAL Y MÉTODO.....	31
2.1. Diseño de la investigación.....	31
2.2. Participantes	31
2.3. Variables	32
2.3.1. Variables independientes	32
2.3.2. Variables dependientes	33
2.3.3. Control de las condiciones del experimento	37
2.4. Desarrollo del experimento	37
2.5. Instrumentos de medida.....	41
2.6. Tratamiento de los datos.....	41
2.7. Análisis estadístico.....	42
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1. Resultados	43
3.2. Discusión de los resultados.....	47
4. CONCLUSIONES	53
4.1. Conclusiones de resultados	53

4.2.	Conclusiones metodológicas.....	53
4.3.	Limitaciones y futuras líneas de investigación	53
5.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
6.	ANEXOS.....	65
6.1.	Modelo de informe Polar Pro Trainer 5 Software	67
6.2.	Modelo de informe de Kubios HRV 2.0	71

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características de la muestra (n=17).	32
Tabla 2: Variables Dependientes para el análisis de la VFC en el dominio temporal y frecuencial (Task Force, 1996) y Variables Independientes o Factores de clasificación.	35
Tabla 3: Resultados para las variables de VFC según los factores LESIÓN MEDULAR (Sí – No) y TIEMPO (PRE, POST 5 min, POST 10 min), así como la interacción entre los factores LESIÓN MEDULAR y TIEMPO.....	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Instrumentación con banda-sensor.	38
Figura 2: Registro de la FC basal.....	38
Figura 3: Registro de la FC durante la aplicación del ejercicio en cicloergómetro de brazos.....	39
Figura 4: Fase inicial de recuperación tras la finalización del ejercicio	40
Figura 5: Protocolo experimental.....	40
Figura 6: Resultados de la interacción entre los factores TIEMPO y LESIÓN, para la variable HF Power	47
Figura 7: Interacción entre los factores TIEMPO Y LESIÓN, para la variable RMSSD	49
Figura 8: Interacción entre los factores TIEMPO Y LESIÓN, para la variable LF.	51
Figura 9: Interacción entre los factores TIEMPO Y LESIÓN, para la variable HF Power	52

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Lesión Medular

La médula espinal forma parte del sistema nervioso central (SNC). Se encarga de la transmisión de información al cerebro del resto del organismo y envía las órdenes motoras que regulan los movimientos. Su interrupción producirá parálisis de la movilidad voluntaria, alteraciones o ausencia de sensibilidad por debajo del nivel de lesión, falta de control de esfínteres, trastornos de la esfera sexual, alteraciones del sistema nervioso vegetativo y riesgo de graves complicaciones para el resto de la vida (Vidal et al., 2003).

Por tanto, la lesión medular (LM) se define como la lesión de los elementos neurales contenidos dentro del canal medular (Zarco et al., 1999). Las personas con LM presentan una pérdida de su función motriz con la consiguiente reducción de su actividad física, lo que les conduce a un estilo de vida más sedentario y a una disminución de su capacidad física (Brizuela Costa, Sinz, Aranda Malavés, & Martínez Navarro, 2010).

En su práctica diaria las personas con LM deben enfrentarse a esfuerzos que son proporcionalmente mayores que los que se enfrentan personas sin LM, con lo cual, el desplazarse con la silla de ruedas les supone un modo altamente ineficiente y extenuante de ejercicio (Dallmeijer, van der Woude, Hollander, & van As, 1999).

1.2. Tetraplejia

Si la lesión es producida por encima de la primera vértebra dorsal (T1), se considera una tetraplejia. Con ello se produce la pérdida de los músculos de los miembros inferiores, extremidades superiores y diafragma. A mayor altura de la lesión, más alterada se encuentra la función cardiorrespiratoria y por tanto mayor será la restricción de la capacidad voluntaria de ejercicio (Davis, 1993).

A medida que la lesión es más alta, el grado de limitación funcional también aumenta. Las personas con tetraplejia conservan a menudo inervaciones proximales de algunos músculos de los miembros superiores, así como la sensibilidad de éstos, de las articulaciones y de la piel circundante. También

1. Introducción

pueden conservar el control respiratorio del músculo diafragma y algunos músculos accesorios, las funciones nerviosas craneales, el tono intrínseco vascular, los reflejos cardiovasculares de la médula espinal aislada, el sistema renina-angiotensina, la taquicardia barorrefleja por inhibición vagal, el mecanismo de Frank-Starling y los fenómenos metabólicos locales de los músculos activos (Figoni, 1993).

La parálisis de los músculos esqueléticos es el problema funcional más evidente en las personas con tetraplejia. La actividad de la musculatura de los miembros superiores suele encontrarse limitada a consecuencia de una inervación parcial de la misma por medio de las fibras nerviosas no afectadas, lo que provoca que las actividades voluntarias estén limitadas a pequeños grupos musculares. Esta es la razón por la que, personas con tetraplejia, suelen tener una vida sedentaria que favorece un deterioro funcional generalizado (Figoni, 1993). Una pérdida de masa muscular atribuible a la parálisis provoca un cambio en la composición corporal de la masa magra (compuesta por músculo esquelético) con la grasa y por tanto, la promoción de la resistencia a la insulina (Myers, Lee, & Kiratli, 2007b).

1.3. Alteraciones cardiovasculares en personas con LM

Los procesos cardiovasculares más comunes observados en las personas con LM, dentro de la fase crónica, incluyen: hipotensión ortostática, deterioro de los reflejos cardiovasculares, disreflexia autonómica (por encima de T6), deterioro de la transmisión del dolor cardiogénico (por encima de T4), pérdida de la aceleración cardíaca refleja (lesiones entre T1-T4), atrofia cardíaca con la disminución de la masa ventricular izquierda, infarto miocárdico (Phillips et al., 1998). Las limitaciones de la función simpática suele reducir la respuesta cardiorrespiratoria, enlenteciendo con ello los procesos que se requieren para llevar a cabo la actividad física (Yamasaki et al., 2001). Así mismo, la pérdida de la capacidad física por el estilo de vida sedentario, debida a la restricción del ejercicio que ocasiona el propio déficit de respuesta del sistema nervioso autónomo, contribuye al incremento de la pérdida de capacidad cardiorrespiratoria y muscular (Phillips et al., 1998).

La inactividad física predispone de forma directa a la adquisición del síndrome metabólico (SM). El SM es un estado prediabético caracterizado por un grupo de factores de riesgo metabólico (obesidad, hipertensión arterial, resistencia a la insulina y dislipidemia aterogénica), considerado como uno de los principales factores de riesgo para el corazón y donde se ha demostrado estar presente en el 23 % de las personas con LM (el doble que en personas sin LM y edad similar), y de mayor incidencia de la enfermedad en personas con tetraplejia (Myers et al., 2007b).

A pesar de que la reducción de la masa muscular es un factor fundamental que contribuye a la inactividad, la LM se asocia a con una disfunción significativa de sistema nervioso simpático (SNS) denominada disreflexia autonómica (DA). La DA se podría definir como una respuesta simpática inadecuada y masiva a la activación de las vías aferentes nociceptivas y no nociceptivas desde las vísceras y la piel (McLachlan, 2007). Esta alteración de la actividad del SNS se produce como consecuencia de la pérdida del control supraespinal del SNS y se complica aún más por tres fenómenos posteriores que se producen por debajo del nivel de lesión: reducción de la actividad simpática en general (resultado de la hipotensión ortostática baja presión arterial en reposo, pérdida de la fluctuación diurna de la presión arterial, bradicardia refleja, y raramente, paro cardíaco), hiperreactividad periférica alfa-adrenérgica y los cambios morfológicos en las neuronas simpáticas preganglionares (Teasell, Arnold, Krassioukov, & Delaney, 2000).

La DA es un síndrome caracterizado por un incremento abrupto y marcado de la presión arterial (PA), aunque un aumento de 20 a 40 mm de Hg por encima de la presión sistólica basal (o de un 20% o más de la misma), es suficiente como indicador diagnóstico. Se desencadena por estimulación nociceptiva generada por debajo de la lesión, que provoca una actividad simpática refleja descontrolada, con una respuesta simpática exagerada caudal a la lesión y que puede poner en peligro la vida del paciente (Karlsson, 1999).

La DA se caracteriza por la presentación súbita de cefalea, hipertensión y eritema, como respuesta a una aferencia sensitiva de origen distal al punto de la lesión. Los estímulos que se han identificado con mayor frecuencia como

1. Introducción

desencadenantes de una crisis de disautonomía son la distensión vesical y la impactación fecal. La pérdida de la actividad simpática conlleva disminución de la resistencia periférica y vasodilatación, que se hace más manifiesto en las lesiones por encima de T6, a esto se le añade el consecuente predominio del tono vagal, y como consecuencia el paciente va a estar hipotenso y bradicárdico (Phillips et al., 1998).

Entre otros trastornos de las funciones autonómicas se encuentran las alteraciones de la termorregulación, la cual puede hacer de las personas con LM más susceptibles a las variaciones de la temperatura (Kalincik, Jozefcikova, Waite, & Carrive, 2009). Es producida por una disipación de calor corporal debida a la vasodilatación cutánea consecutiva a la ausencia de respuesta simpática. Según Guttman (1981), T8 es el nivel límite que permite una adecuada termorregulación. Las lesiones localizadas por encima de esta vértebra conllevan una adaptación deficiente, más grave cuanto más alto sea el nivel neurológico.

Otra disfunción cardiovascular observada en personas con LM es la hipotensión ortostática (HO), frecuente tanto en la fase aguda como en la fase crónica de la LM (V. E. Claydon, Steeves, & Krassioukov, 2006). La HO se puede definir como la disminución súbita de la presión arterial cuando la persona con LM pasa de decúbito a posición erecta. Constituye un problema frecuente, sobretudo en personas con tetraplejia, y en éstos la presentación clínica es más grave, cursando con sensación nauseosa, mareo o incluso síncope (Rodríguez, 2005). Se debe a que el descenso del control simpático de las neuronas preganglionares puede estar interrumpido junto con problemas de control vasomotor, que predisponen a HO y otros trastornos de control de la presión arterial. El estancamiento de sangre venosa en las extremidades inferiores puede ser mayor que en personas sin LM, en los que el músculo esquelético realiza una función de bombeo de sangre promoviendo el retorno venoso y manteniendo la presión arterial. También puede haber alteraciones de sal y agua que conduce a la hipovolemia, y cierto grado de baja condición física cardiovascular después de la LM, los cuales podrían predisponer a la HO (V. E. Claydon & Krassioukov, 2006).

1.4. Ejercicio físico en personas con LM

Como se ha comentado, la interrupción de la vía aferente simpática produce una pérdida del control vascular por los centros superiores del cerebro y la incapacidad de que puedan responder eficazmente a los reflejos cardiovasculares y modificar el tono vascular. De este modo puede desaparecer el control central del sistema simpático del miocardio, músculos lisos de arterias y venas, y de la médula adrenal (Figoni, 1993). Por lo tanto, el ejercicio voluntario de brazos no suele activar el sistema nervioso simpático (SNS) en personas con tetraplejia (Glaser, 1989). No obstante, en algunos estudios experimentales realizados en personas con tetraplejia durante el ejercicio en silla de ruedas, se ha demostrado un incremento de noradrenalina plasmática, lo que hace pensar que podría existir una cierta cantidad procedente de las terminaciones nerviosas de los músculos de los brazos (Chicharro, Vaquero, & Arce, 2003).

Las alteraciones circulatorias que las personas con una LM crónica experimentan, son dependientes del nivel lesional. En lesiones por encima de D1 (primer segmento neurológico dorsal), lesiones cervicales y dorsales altas, son frecuentes los cuadros de hipotensión, con cifras tensionales máximas de unos 70 mmHg. Estas personas, con estos niveles lesionales, presentan una reducción crónica de la precarga cardíaca y del volumen sanguíneo, que causará a largo plazo una atrofia del ventrículo izquierdo (M. S. Nash, 1994).

V.E. Claydon, Hol, Eng, & Krassioukov (2006), describieron la respuesta de la presión arterial durante la recuperación del ejercicio y la incidencia asociada de hipotensión y arritmia cardíaca en personas con LM. Es probable que personas con lesión cervical presenten episodios sincopales, especialmente si el ejercicio se combina con alguna situación que provoque vasodilatación, como por ejemplo un ambiente cálido. No parece que tengan un mayor riesgo de arritmias cardíacas durante o después del ejercicio. Sin embargo, sí hay mayor riesgo cardiovascular asociado si hay presencia de DA durante el ejercicio.

Estos autores recomiendan la realización de ejercicio y afirman que es seguro y particularmente importante dada la alta incidencia de mortalidad y morbilidad cardiovascular en personas con LM. Aún así, aconsejan prestar atención en

1. Introducción

minimizar los riesgos de hipotensión inmediatamente después del ejercicio con la ingesta adecuada de líquidos, evitando el sobrecalentamiento y adopción de posturas que reduzcan el estancamiento venoso (V. E. Claydon & Krassioukov, 2006).

La parálisis vasomotora dificulta la redistribución sanguínea normal en posición erguida durante el ejercicio. Esto es debido a un excesivo reservorio venoso que dificulta el retorno sanguíneo, limitando el llenado ventricular y la actividad miocárdica por el mecanismo Frank-Starling, lo que hace disminuir el volumen sistólico, y por tanto, el gasto cardíaco. Así mismo, durante la vasodilatación muscular sin vasoconstricción simpática compensatoria o refleja, el movimiento de incorporación a la posición erguida puede producir cuadros de hipotensión que limitan la tolerancia al ejercicio. Las personas con tetraplejía pueden sufrir atrofia miocárdica al ser incapaces de conseguir un llenado ventricular, lo que comprometerá su rendimiento aeróbico y su capacidad funcional cardiovascular. Estos cambios son atribuibles tanto a la inmovilización física como a la falta de regulación autonómica circulatoria impuesta por la LM (Figoni, 1993). Las personas con lesión por debajo de T6 no tienen complicaciones cardíacas significativas relacionadas con la hiperactividad vagal, debido a que la inervación simpática del corazón es de T3-T4 (Phillips et al., 1998).

Autores como (Bizzarini et al., 2005), muestran que existe una reducción en la capacidad de adaptación cardiovascular a la realización del ejercicio en personas con lesión de nivel cervical o dorsal alto, debido a una falta de regulación del sistema simpático, una disminución de las catecolaminas plasmáticas y una disminución de la función pulmonar. En estas personas, la elevación de la FC durante el ejercicio depende de la reducción del tono vagal y de la acción estimulante de las catecolaminas circulantes (Schmid et al., 1998).

Con respecto a las vías aferentes somáticas de los miembros, sólo la información sensorial de los músculos esqueléticos y la piel inervada por los segmentos cervicales superiores por encima de la lesión, es transmitida al centro cardiovascular en el tronco cerebral. Con esto, se ha determinado que la

regulación de la función cardiovascular durante el ejercicio voluntario de brazos en personas con tetraplejia es predominantemente mediada por flujo vagal a la región cardiopulmonar (Takahashi et al., 2004). Estos autores concluyen que durante el “ejercicio estático voluntario”, la adaptación cardiovascular es llevada a cabo por el cambio de la FC, la cual es controlada por la actividad vagal eferente.

Las consecuencias de un ejercicio imprudente pueden ser, a veces, peligrosas. Por este motivo será importante identificar cuáles son aquellas actividades o ejercicios a realizar que no aumenten el riesgo de complicaciones, y que por otro lado reduzcan los factores de riesgo cardiovascular (Vidal et al., 2003).

1.4.1. Valoración del ejercicio cardiorrespiratorio en personas con LM

Las personas con lesiones entre C5 y C8 pueden realizar ergometría de brazos. En el ejercicio incremental, los parámetros ergoespirométricos como la ventilación o el consumo de O₂, aumentan proporcionalmente con respecto a la intensidad del ejercicio, aunque los valores pico se encuentren generalmente por debajo de las personas con paraplejia, y muy por debajo de personas sin LM (Linn et al., 2001). Así mismo, durante la valoración funcional, personas con tetraplejia y paraplejia obtienen volúmenes atenuados de volumen sistólico y gasto cardíaco durante el ejercicio en comparación con personas sin LM (Glaser, 1989). Como se ha apuntado existe una importante insuficiencia vascular periférica, y una falta de actividad en los músculos periféricos que constituyen la bomba venosa, lo que produce un gran secuestro de sangre en las zonas declives del cuerpo (Chicharro et al., 2003). Este fenómeno es denominado “circulación hipocinética”, con lo cual las cifras pico de VO₂, gasto cardíaco, volumen sistólico y FC, durante el ejercicio en ergómetro, aumentan en posición decúbito (Figoni, 1993).

Por las razones expuestas no se puede evaluar la capacidad funcional cardiovascular central de los parámetros citados, debido a la incapacidad de sobrecargar adecuadamente el corazón con este tipo de ejercicio. Sin embargo, sí que se puede evaluar la intensidad pico delimitada por los sistemas fisiológicos implicados en el ejercicio en cuestión. Durante la

1. Introducción

valoración funcional ergométrica, la fatiga periférica suele aparecer antes de que se haya producido la sobrecarga cardiovascular (Chicharro et al., 2003).

Estudios recientes han corroborado que la respuesta de los parámetros cardioventilatorios es proporcional al aumento de la carga, permitiendo evaluar la repercusión de un ejercicio y evitando así una excesiva intensidad que produzca cambios cardiorrespiratorios que pudieran traer consigo problemas añadidos. La FC presenta una excelente correlación con el consumo de oxígeno y puede ser utilizada como un parámetro para cuantificar la repercusión cardiorrespiratoria y metabólica de la carga a la que es sometido el sujeto (Vidal et al., 2003).

1.4.2. Adaptaciones fisiológicas al ejercicio en personas con LM

Los programas de entrenamiento realizados con tetrapléjicos muestran que pueden mejorar su tolerancia al ejercicio, la resistencia muscular, la resistencia pico y el consumo de oxígeno, pero sin la concurrencia de adaptaciones cardiovasculares centrales. Aún así, pueden demostrarse las adaptaciones periféricas, que tendrán una notable importancia para la mejora de la calidad de vida (Chicharro et al., 2003).

Cuando el ejercicio se realiza en la posición de sentado, la FC suele estar limitada a unos 120 ppm, y el gasto cardíaco, el volumen sistólico y la presión arterial suelen ofrecer valores por debajo de lo que cabría esperar para valores determinados de consumo de oxígeno (Figoni, 1993).

Sin embargo, si minimizamos las limitaciones vasculares periféricas, mediante la práctica de ejercicio tumbado, la compresión de la parte inferior del cuerpo, el incremento del reclutamiento muscular con estimulación eléctrica o la administración de sustancias dopaminérgicas, el ejercicio podría permitir cierto grado de sobrecarga cardiovascular y sus adaptaciones al entrenamiento (Phillips et al., 1998).

Para probar si el ejercicio aumenta la masa del ventrículo izquierdo en personas con tetraplejia con lesión completa en su fase crónica, M. S. Nash et al. (1991), sometieron a ocho hombres durante seis meses de entrenamiento, mediante electroestimulación del cuádriceps durante el pedaleo en bicicleta.

Estos autores encontraron un aumento significativo del 35 % en el desarrollo de la masa del ventrículo izquierdo, indicando que la atrofia del miocardio en personas con tetraplejia se invierte tras la práctica de ejercicio mediante estimulación eléctrica.

Asimismo, las personas con LM pueden presentar a menudo aumento de la resistencia vascular en los miembros paralizados, que puede revertir con el ejercicio y con la estimulación eléctrica funcional (Hopman, Groothuis, Flendrie, Gerrits, & Houtman, 2002).

Se ha demostrado que el entrenamiento con electroestimulación en cicloergometría, ofrece una buena respuesta fisiológica en personas con tetraplejia desde el punto de vista de la estimulación del metabolismo aeróbico y la respuesta cardiovascular (Figoni, 1993; Phillips et al., 1998). El ejercicio que incorpora tanto las extremidades superiores e inferiores es un medio viable para promover mejoras en el rendimiento aeróbico (Wong & Warburton, 2010).

1.4.3. Beneficios de la Actividad Física en personas con LM

Se han demostrado resultados beneficiosos en personas con LM que han incorporado a su estilo de vida la práctica habitual de ejercicio físico (M.S. Nash, 2005), especialmente el que se realiza dentro del marco del reaprendizaje motor basado en tareas (D. S. Ditor et al., 2005), ya que las actividades basadas en movimientos pasivos no logran la misma adaptación neuromuscular (Ter Woerds, De Groot, van Kuppevelt, & Hopman, 2006). La práctica habitual de ejercicio puede reducir la fatiga, el dolor, la debilidad muscular y la degeneración articular y ósea que se va produciendo por la inactividad física. Todo ello aumenta la calidad de vida y el grado de satisfacción de las personas con LM (Chicharro, 2008).

La realización de ejercicios ayuda a mejorar su capacidad funcional, pero están limitados en el tipo de ejercicio que pueden realizar. Debido a la parálisis de las extremidades inferiores después de la LM, las personas comúnmente realizan ejercicio en la parte superior del cuerpo mediante el pedaleo de brazos (Jacobs & Mahoney, 2002). El pedaleo de brazos puede considerarse 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 (Dallmeijer, Zentgraaff, Zijp, & van der Woude, 2004) y para mejorar o mantener niveles de condición física adecuados (Noreau & Shephard, 1995; Otis, Drinkwater, Johnson, Loucks, & Wilmore, 1997), incluso en personas con tetraplejía (Valent et al., 2009).

El pedaleo de brazos, utilizando lo que se denomina normalmente bicicleta estática (adaptada a tal fin), podría ser un tipo de ejercicio muy efectivo para mejorar el bienestar tanto físico como psicológico de las personas con LM (Brizuela Costa et al., 2010; Hicks et al., 2003). También puede ser útil para la movilidad diaria en un entorno ergonómico adecuado, donde personas con una baja capacidad física pueden beneficiarse de la actividad bajo supervisión inicial de profesionales cualificados y tras un periodo de entrenamiento, puede ser una motivación para conseguir mejoras en el nivel de condición física y distancias recorridas (Valent et al., 2009).

1.5. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca

La frecuencia cardíaca es uno de los parámetros más utilizados para valorar la actividad cardíaca. Los latidos se producen en una frecuencia variable, durante el reposo, es decir, el tiempo en milisegundos entre dos latidos va variando latido a latido (Rodas, Pedret Carballido, Ramos, & Capdevila, 2008). Los intervalos entre latidos muestran, entre sí, diferencias leves de duración que se traducen en cambios del ritmo cardíaco. Estos cambios siguen ciertos patrones de repetición, por lo que los acortamientos y prolongaciones de los intervalos se repiten de manera cíclica (Migliaro & Contreras, 2005).

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 et al., 1981; Malik et al., 1996), y permite obtener indicadores que se relacionan con la salud en la población general, que son sensibles a trastornos fisiológicos y psicológicos (Ortis et al., 2008).

La VFC describe las diferencias entre latidos consecutivos. El ritmo del corazón está controlado por el nódulo sinoauricular, que se modula tanto por las ramas simpáticas como parasimpáticas del SNA. La actividad simpática tiende a aumentar la FC y su respuesta es lenta (unos segundos). La actividad parasimpática, por el contrario, tiende a disminuir la FC y de forma más rápida (0,2 a 0,6 segundos) (Berntson, 1997). La VFC es el resultado de las interacciones entre el SNA (con su equilibrio simpático-vagal). En un estado de reposo predomina la estimulación vagal (SNP), mientras que en estados de ansiedad, stress y ejercicio físico predomina la estimulación del SNS (Kleiger, Stein, & Bigger, 2005).

Además del control central, existen algunos mecanismos de retroalimentación que pueden proporcionar rapidez de los reflejos, como por ejemplo el mecanismo barorreflejo arterial del sistema cardiovascular. Este reflejo se basa en la detección del aumento de las paredes de los vasos grandes por los barorreceptores, los cuales pueden detectar el incremento de la presión causada por el estiramiento de las mismas. Tanto la actividad simpática como parasimpática son influenciadas por la estimulación de los barorreceptores a través de arcos reflejos específicos (Tarvainen & Niskanen, 2008).

Las continuas modulaciones de las inervaciones simpáticas y parasimpáticas dan lugar a variaciones en la FC. Los intervalos RR fluctúan cíclicamente, modulados por la ventilación, los barorreflejos y otros factores genéticos y ambientales que están mediados por el SNA (Kleiger et al., 2005).

El análisis adecuado del equilibrio del SNA, principalmente mediante la VFC y en menor medida por la sensibilidad barorrefleja y quimiorrefleja, puede aportar información muy útil tanto en personas enfermas como en personas sanas. Es un valor para la medición de la función del SNA, que describe la capacidad del organismo, en especial del sistema cardiovascular, para cambiar el intervalo temporal latido a latido, dependiendo de la intensidad de trabajo, para poder adaptarse a las demandas cambiantes tanto internas como externas (Rodas et al., 2008). Una reducción del tono vagal cardiaco y consecuentemente de la variabilidad de la FC, independientemente del protocolo de medición, está relacionada con la disfunción autonómica en

enfermedades crónico-degenerativas y con aumento del riesgo de mortalidad (Tapanainen et al., 2002).

1.5.1. Medición de la VFC

La manera habitual de medir la variabilidad es mediante electrocardiograma (ECG) de 24 horas con registros Holter, donde se detecta de forma precisa el complejo QRS y se calcula el tiempo entre las diferentes ondas R consecutivas o intervalo RR. El avance tecnológico ha permitido realizar estos análisis mediante el perfeccionamiento de aparatos portátiles POLAR, donde se tiene también la opción de medir de forma válida y fiable la VFC, mientras el sujeto en estudio realiza cualquier actividad, incluyendo ejercicio físico (Gamelin, Berthoin, & Bosquet, 2006; Pumpila, Howorka, Groves, Chester, & Nolan, 2002).

Existen diferentes métodos para cuantificar la VFC que permiten obtener múltiples y variados parámetros. Actualmente, los métodos más utilizados dentro del análisis lineal son los que se basan en el dominio temporal, dominio espectral o de frecuencia. Dentro del análisis no-lineal los métodos más utilizados son el *power law slope*, *Detrended Fractal Scaling Exponent*, *Poincaré plot* y *Heart rate turbulence* (Kleiger et al., 2005).

1.5.2. Análisis de la VFC

Parámetros del dominio temporal

En el análisis de dominio temporal, se miden los intervalos entre las ondas R adyacentes (intervalos RR) durante el periodo de grabación. Las variables de tiempo son las que resultan de la medición electrocardiográfica de los intervalos RR normales. Estos intervalos RR son analizados estadística y matemáticamente para obtener los diferentes parámetros. Una variedad de variables estadísticas se pueden calcular estadísticamente y otras se pueden derivar de diferencias de intervalos (Kleiger et al., 2005; Niskanen, 2004). Las más extendidas en su utilización y mayor información nos pueden aportar son las siguientes:

- RRi: Es la media de todos los intervalos RR del período medido.

- SDNN: Es la desviación estándar de todos los intervalos RR del periodo medido. Es un indicador independiente de las frecuencias para definir el concepto de variabilidad total. El cálculo exacto de esta variable requiere una cuidadosa medición para excluir latidos ectópicos, artefactos y ritmos perdidos. Intervalos artificiales que pueden ocurrir por estos eventos pueden incrementar artificialmente el SDRR.
- rMSSD: Es la raíz cuadrada del valor medio de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos. Este parámetro informa de las variaciones a corto plazo de los intervalos RR y se utiliza para observar la influencia del SNP sobre el sistema cardiovascular. Se asocia directamente a la variabilidad a corto plazo.

Otras variables que también se están utilizando dentro el análisis del dominio temporal son las siguientes:

- SDANN: Desviación estándar de los periodos NN (o RR) con una media de medida de 5 min.
- ASDNN (índice): Índice de las desviaciones estándar de todas las medidas de los intervalos RR de 5 min a lo largo de 24 horas.
- NN50: Es la cuenta absoluta entre diferencias de intervalos sucesivos >50 ms.
- pNN50: Porcentaje de los intervalos RR consecutivos que discrepan en más de 50 ms entre sí. Un elevado valor de pNN50 nos proporciona valiosa información acerca de variaciones altas espontáneas de la FC.

Los parámetros obtenidos en el dominio del tiempo se ven influenciados por cambios en la actividad del SNS y del SNP, circunstancia que hace que estas medidas no sean específicas para calcular de manera concreta el equilibrio simpático-vagal. Son parámetros útiles para detectar anomalías de la actividad del SNA pero no se pueden utilizar para cuantificar cambios específicos de la actividad del SNS y SNP (Malik, 1997; Pumpura et al., 2002). Por tanto, el hecho de que los valores sean inversamente proporcionales a la fracción cardíaca provoca que el valor predictivo que poseen sea más complicado de valorar de lo que a primera vista parece, ya que en esta

valoración se deben tener en cuenta los mecanismos neurales y no-neurales (Task Force, 1996).

El SNP se puede observar sobre los parámetros de tiempo gracias a que la VFC disminuye cuando disminuye la actividad vagal. Por otro lado los efectos opuestos de la actividad del SNS son más complicados de objetivar, ya que hay que tener en cuenta efectos que influyen de manera directa como puede ser la bradicardia, la acción de algunos neurotransmisores (noradrenalina...), y el efecto de ventilación entre otros. Diversos estudios destacan que las variables del dominio temporal deben tener un papel importante en la estratificación del riesgo de morbi-mortalidad, especialmente en pacientes cardiovasculares (Rocchetti, Malfatto, Lombardi, & Zaza, 2000).

Parámetros del dominio frecuencial (análisis espectral)

Para el análisis del dominio frecuencial, se calcula, para las series de intervalos RR, una estimación de la densidad del espectro de frecuencias (DEF). Los estimadores regulares de la DEF asumen muestreos equidistantes y, por tanto, las series de intervalos RR se convierten en series de muestras equidistantes por métodos de interpolación previos a la estimación de la DEF (Niskanen, 2004; Tarvainen & Niskanen, 2008).

En el análisis de la VFC, la estimación de la DEF se obtiene a partir de una transformada matemática, habitualmente la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que genera un espectro de potencias donde se dispone la potencia de cada onda en función de su frecuencia. El espectro se divide en bandas frecuenciales y sobre esta base se estima la densidad espectral de cada banda. En el caso del espectro de FFT, los valores de la potencia absoluta para cada banda de frecuencia son obtenidos simplemente integrando el espectro sobre los límites de la banda (Tarvainen & Niskanen, 2008).

El análisis del espectro de frecuencias se suele realizar en medidas electrocardiográficas de cortos periodos de tiempo (aproximadamente 5 minutos) donde se analizan los picos de las diferentes frecuencias que se observan. También se pueden realizar análisis frecuenciales en periodos más largos de hasta 24h (Task Force, 1996).

Componentes espectrales

Existen 3 componentes espectrales en caso de grabaciones de cortos espacios de tiempo. Estos diversos componentes espectrales se correlacionan con los diferentes componentes del SNA. De esta forma, la mayor parte de la potencia de la señal se encuentra en un margen de 0 a 0,4 Hz (Task Force, 1996).

El componente periódico más notable de la VFC es la denominada arritmia sinusal respiratoria, la cual se considera que se encuentra entre un rango de 0,15 y 0,4 Hz. Esta modifica los intervalos siguiendo el patrón de la respiración, lo que impone una frecuencia de variación relativamente alta si la comparamos con las demás influencias. Este componente de alta frecuencia (HF), se cree generalmente que es de origen parasimpático. Otro componente extensamente estudiado dentro de la VFC es la baja frecuencia (LF), que por lo general va desde 0,04 hasta 0,15 Hz y donde se incluye el componente referido al ritmo de 10 segundos o la onda de Mayer (Akselrod et al., 1981; Berntson, 1997).

Los ritmos dentro de la banda LF, se ha pensado que probablemente pueden ser tanto de origen simpático como parasimpático, aunque algunos investigadores han sugerido que son principalmente de origen simpático. Las fluctuaciones por debajo de 0,04 Hz, no se han estudiado tanto como las frecuencias más altas, y en casos de grabaciones de corto plazo por lo general suelen ser omitidas (Task Force, 1996). Estos ritmos de baja frecuencia, los cuales abarcan bandas de muy baja frecuencia (VLF, 0.003-0.04 Hz) y ultra baja frecuencia (ULF, 0-0.003 Hz), son característicos de las señales de VFC y se han relacionado, como por ejemplo, con factores humorales tales como procesos de termorregulación y el sistema renina-angiotensina (Akselrod et al., 1981; Berntson, 1997). De la ratio o proporción LH/HF, se puede estimar la influencia vagal (relacionada con la relajación y las HF) y la simpática (relacionada con el estrés y las LF). De esta forma se puede obtener el equilibrio simpático-vagal (Eckberg, 1997).

Según diversos estudios citados anteriormente, si predomina la influencia del SNS de manera permanente, puede ser causa de trastornos de salud y puede peligrar el equilibrio biofísico de la persona. En este caso encontraríamos que la VFC está disminuida. Una VFC alta parece ser un indicador de buena salud.

Debido a la controversia en la interpretación de la banda LF de forma aislada, se utiliza la proporción LF/HF para estimar de manera más efectiva la actividad del SNS (Rodas et al., 2008).

Otras técnicas utilizadas corresponden a métodos no-lineales que han despertado un gran interés por parte de los investigadores en años anteriores

1.5.3. La VFC durante el reposo, el ejercicio y la recuperación

La VFC es más evidente en reposo que en el ejercicio. Como se ha comentado anteriormente, de una forma general, se admite que la VFC sea un marcador de la actividad autonómica, o sea, cuanto mayor es la oscilación de la FC en reposo, mayor la participación vagal. Una reducción del tono vagal y consecuentemente de la VFC, está relacionada con una disfunción autonómica, enfermedades crónico-degenerativas y riesgo de mortalidad aumentado (Tapanainen et al., 2002).

Durante la práctica de actividad física, así como también en situación de “lucha o fuga”, la estimulación de los nervios simpáticos liberan catecolaminas: adrenalina, noradrenalina. Estas hormonas actúan acelerando la despolarización del nódulo sinusal, lo que induce el aumento de la FC (Barrera García & Gonçalves De Abreu, 2009).

Algunos autores han demostrado que la FC durante los test de carga progresiva presenta un aumento de inicial influenciada por la retirada parcial del SNP, comenzando entonces la predominancia del SNS (Alonso et al., 1998; Nobrega & Arujo, 1993). Se ha demostrado la participación exclusiva del nervio vago en la respuesta de la FC durante el transcurso inicial del ejercicio (Araújo, Nóbrega, & Castro, 1992) y la predominancia de la actividad vagal durante el reposo, siendo gradualmente inhibida en el ejercicio submáximo tanto activo como pasivo (Nobrega & Arujo, 1993; Nurhayati & Boutcher, 1998) hasta el nivel máximo de esfuerzo, donde la actividad parasimpática es totalmente inhibida, produciendo menor o ausencia de variabilidad en la FC (Alonso et al., 1998).

Se puede decir que en el inicio y durante los niveles bajos a moderados de intensidad del ejercicio, el aumento de la FC es estimulada por la disminución

de la estimulación parasimpática. Durante el ejercicio más extenuante, la aceleración de la FC es consecuencia de la activación directa de los nervios simpáticos y la magnitud de la aceleración aumenta en proporción directa con la intensidad y duración del esfuerzo (Barrera García & Gonçalves De Abreu, 2009).

En cuanto a la condición física y la edad, (Tulppo, Mäkikallio, Seppänen, Laukkanen, & Huikuri, 1998) encontraron que una mala condición física se asocia a un deterioro de la función cardíaca vagal durante el ejercicio, mientras que en el envejecimiento se produce un deterioro más evidente de la función vagal en reposo..

Durante la recuperación inmediata después del ejercicio, ocurren rápidos cambios en las funciones cardíacas. Se sabe que tras la finalización del ejercicio incrementa la actividad parasimpática y disminuye de la actividad simpática (Pierpont, Stolpman, & Gornick, 2000). Cole, Blackstone, Pashkow, Snader, & Lauer (1999), encontraron que una disminución retardada de la FC durante el primer minuto de recuperación tras el ejercicio es un poderoso predictor de la mortalidad.

La relación entre la VFC y la modulación autonómica no es simple. Sin embargo, es bien sabido que durante el reposo la alta frecuencia (HF Power) se modula en esencia, como se ha comentado, por las fluctuaciones en la rama parasimpática del SNA (Akselrod et al., 1981; Berntson, 1997). Aunque la HF Power y las diferentes condiciones fisiológicas han sido ampliamente estudiadas durante el reposo, la dinámica de la recuperación después del ejercicio ha sido poco investigada. Uno de los estudios significativos sobre el tema lo publicaron (Kaikkonen, Nummela, & Rusko, 2007). Estos investigadores estudiaron la dinámica de la VFC durante la reactivación vagal, es decir, durante la recuperación inmediata tras la realización de diferentes ejercicios, estos realizados a intensidades diferentes (baja, media y alta intensidad) y dos distancias de recorrido por cada una de ellas (corta y larga).

Estos autores encontraron un incremento HF Power durante los primeros 5 minutos de recuperación después de cada ejercicio, a excepción del ejercicio de alta intensidad, lo que sugiere que durante la recuperación en la baja y

media intensidad hay una reactivación vagal más rápida. También encontraron que la intensidad del ejercicio afecta de manera significativa al nivel de VFC post-ejercicio, pero sin obtener diferencias de la VFC en recuperación sobre la distancia recorrida (Kaikkonen et al., 2007).

Recientemente, se ha estudiado la respuesta cardíaca sobre la función autonómica en la recuperación, tras la realización de un test de esfuerzo máximo en personas con paraplejia (Jae, Heffernan, Lee, & Fernhall, 2010). Su comparativa se centra en ver si existe relación entre los datos obtenidos en reposo con el primer y segundo minuto de recuperación tras realizar la prueba de esfuerzo, en los componentes espectrales de baja y alta frecuencia (LF y HF Power). Estos autores, sugieren que la recuperación de la FC puede ser útil para la evaluación autonómica en personas con paraplejia.

1.6. VFC en personas con lesión medular

La actividad del SNA en personas con tetraplejia crónica se encuentra deprimido pero mantiene la homeostasis (Wang et al., 2000). Al producirse la descentralización simpática, el control de la FC por el sistema autónomo lo realiza fundamentalmente el SN parasimpático (Takahashi et al., 2004).

Un gran número de investigaciones en los últimos años han empleado los índices de VFC para evaluar el balance autonómico en diversas enfermedades crónicas, incluyendo enfermedades neuromusculares, neuropatía diabética y LM. La LM presenta un buen modelo para la aplicación de la VFC, ya que la interrupción de las vías simpáticas eferentes que inervan el sistema nervioso cardiovascular altera el normal equilibrio del SNA, que se refleja en los patrones de la VFC (Myers, Lee, & Kiratli, 2007a).

La VFC puede utilizarse para la predicción del riesgo de morbilidad y mortalidad en personas con LM (D.S. Ditor et al., 2005b; Millar et al., 2009). Se ha observado una asociación inversa entre el nivel e integridad de la lesión y la disfunción autonómica expresada en parámetros de VFC (Bunten, Warner, Brunnemann, & Segal, 1998; Grimm, De Meersman, Almenoff, Spungen, & Bauman, 1997). Estos resultados reflejan una regulación a la baja de la VFC del sistema nervioso parasimpático y una disminución de la inervación

simpática eferente hacia el sistema cardiovascular. Además confirman que la VFC es diferente en personas con LM frente a personas sin LM.

Sin embargo, existen pocos estudios en los que se investiguen los efectos que provoca el ejercicio cardiovascular sobre la VFC en personas con tetraplejia. La mayoría de ellos están relacionados bien con el entrenamiento ortostático (HUTT) (Millar, et al., 2009), o bien, con la marcha asistida mediante tapiz rodante (BWSTT) (D. Ditor et al., 2005; D.S. Ditor et al., 2005a).

Recientemente, otros investigadores, han comprobado mediante la utilización de ejercicios de contracción voluntaria máxima de brazos, que la descentralización simpática provoca ausencia de vasoconstricción periférica, y disminución del incremento de la FC especialmente en el comienzo del ejercicio (Takahashi et al., 2007). Sus resultados sugieren que es probable que, aunque la respuesta de retirada de la estimulación parasimpática cardiaca se conserve en sujetos tetrapléjicos, la descentralización simpática impide la aceleración rápida de la FC al inicio del ejercicio así como la posterior rápida desaceleración, que ocurre en condiciones normales.

Estudios recientes han demostrado que la aplicación de un entrenamiento mediante pedaleo de brazos, realizado por personas con tetraplejia, tiene un efecto positivo en el sistema respiratorio y cardiovascular (Brizuela Costa et al., 2010). Estos autores encontraron que durante un entrenamiento de 8 semanas mejoró significativamente la VFC, tanto en sus índices temporales como en aquellos derivados del dominio espectral. En relación con la entrenabilidad, demostraron que las personas con tetraplejia mantienen la habilidad de producir adaptaciones positivas en su regulación autónoma.

De acuerdo a lo expuesto, queda por profundizar en el conocimiento de la respuesta de la VFC en personas con tetraplejia así como en el efecto del ejercicio sobre los parámetros de la VFC, especialmente durante la recuperación, tras el ejercicio.

1.7. Objetivos e hipótesis

Una vez analizados los conocimientos actuales sobre la cuestión y contrastados con las necesidades e intereses del grupo de investigación, se

1. Introducción

proponen los siguientes objetivos de trabajo, estructurados en primer lugar como unos objetivos generales y posteriormente como unos objetivos específicos.

Objetivos Generales:

Analizar la VFC en personas con tetraplejia y ver qué diferencias existen entre su respuesta en reposo y durante la recuperación, tras la realización de ejercicio físico. Así mismo, se pretende comprobar las diferencias en VFC debidas a la propia LM, comparando su respuesta cardíaca con personas sin LM.

Objetivos específicos:

1. Evaluar la VFC en personas con tetraplejia durante el reposo (PRE) y comparar los resultados con los diferentes momentos de la recuperación (POST 5 min y POST 10 min).
2. Evaluar la VFC en personas sin LM durante el reposo (PRE) y comparar los resultados con los diferentes momentos de la recuperación (POST 5 min y POST 10 min).
3. Analizar las diferencias que existen en los patrones de VFC entre personas con tetraplejia y personas sin LM en el momento PRE.
4. Analizar las diferencias que existen en los patrones de VFC entre personas con tetraplejia y personas sin LM en los momentos POST 5 min y POST 10 min.

Hipótesis

Se plantean una serie de supuestos a modo de hipótesis previas:

- Los valores de la VFC en reposo en personas con tetraplejia, difieren de los valores tomados tras el ejercicio, en la fase de recuperación.
- Los valores de la VFC en reposo en personas sin LM, difieren de los valores tomados tras el ejercicio, en la fase de recuperación.

- El comportamiento de la VFC, medida a través de los parámetros del dominio temporal y frecuencial en reposo (valores de normalidad), difieren entre personas con tetraplejia y personas sin LM.
- El comportamiento de la VFC, medida a través de los parámetros del dominio temporal y frecuencial, tomados tras ejercicio, difiere entre personas con tetraplejia y personas sin LM.

1. Introducción

2. MATERIAL Y MÉTODO

2.1. Diseño de la investigación

El presente estudio se encuentra situado en el marco de la investigación cuantitativa, con un diseño cuasi-experimental, donde la muestra ha sido escogida de grupos naturales sin aleatorización.

Con el fin de obtener información sobre la respuesta cardíaca dentro de un mismo grupo, la investigación presenta un diseño intra-grupo, comparando la VFC en reposo con la recuperación tras el esfuerzo en dos momentos de la recuperación tras el esfuerzo (entre los 5 y 10 min posteriores, y entre los 10 y 15 min posteriores), y del mismo modo, mediante un diseño inter-grupo, para obtener información sobre las diferencias entre ambos grupos.

Dado las características especiales de la población a la que se refiere esta investigación y a las limitaciones de trabajar con personas con tetraplejia, se ha escogido una muestra lo más representativa y homogénea posible. Para ello se configuró una muestra de tipo no probabilística intencional, limitada a casos característicos de la población.

2.2. Participantes

En el estudio participaron 18 personas (5 mujeres y 13 hombres), 9 de ellos con tetraplejia originada por una LM de origen traumático, y físicamente activos, y los otros 9 sin LM. Todos los participantes fueron informados de las pruebas a las que iban a ser sometidos y firmaron su consentimiento voluntario.

La muestra de personas con tetraplejia fue seleccionada de entre los participantes del proyecto "Tetrasport" de la Universidad de Valencia y el grupo correspondiente a personas sin LM fueron seleccionados de entre los estudiantes de la Universidad de Valencia, con el requisito de que no fueran deportistas de competición y sus edades estuvieran comprendidas entre los límites de la muestra de personas con LM.

Los participantes fueron divididos en 2 grupos en función de si presentaban LM o no (tabla 1). Por un lado (Grupo A), 8 personas con tetraplejia (7 hombres y 1 mujer) con edades comprendidas entre los 23 y 47 años ($35,12 \pm 8,5$ años) con

2. Material y Método

niveles de lesión comprendidos entre C5 y C7, donde 5 de ellos presentan lesión en C5-C6 (ASIA A-B) y 3 en C6-C7 (ASIA A-B). Todos ellos presentaban musculatura activa en bíceps y deltoides con un balance muscular de 4-5 sobre 5, y además, las personas con nivel de lesión C6-C7 poseían cierta activación del tríceps con un balance muscular de entre 2-4 sobre 5. Este grupo participa en un proyecto de actividad física de forma regular 2 veces por semana.

Por otro lado (Grupo B), 9 personas sin LM (5 hombres y 4 mujeres) con edades comprendidas entre los 22 y 34 años ($27 \pm 3,4$). Con el objetivo de analizar un grupo homogéneo con características físicas similares, se escogieron personas estudiantes físicamente activas pero sin ser deportistas entrenados.

Tabla 1: Características de la muestra (n=17). Grupo A: personas con LM. Grupo B: Personas sin LM.

	Grupo A	Grupo B
Edad	$35,12 \pm 8,5$	$27 \pm 3,3$
Peso (Kg)	$71,47 \pm 11,3$	$69,44 \pm 12,2$

2.3. Variables

Para atender a los objetivos propuestos, se definieron las siguientes variables:

2.3.1. Variables independientes

- **LESIÓN MEDULAR:** Este factor distribuye la muestra en 2 grupos: Grupo A (Sí), donde se incluyen a todas las personas con LM (tetraplejia) y Grupo B (No), donde se incluye a todas las personas sin LM.
- **TIEMPO:** Este factor define el momento en el que se realiza el registro de VFC. PRE (registro basal), POST 5 min (registro tomado durante los primeros 5 minutos de la recuperación tras finalizar el test), y POST 10 min (registro tomado durante los 10 minutos siguientes de la recuperación tras finalizar el test).

2.3.2. Variables dependientes

Las variables dependientes son las correspondientes al análisis de la VFC para el dominio temporal y frecuencial (Tabla 2).

2. *Material y Método*

Tabla 2: Variables Dependientes para el análisis de la VFC en el dominio temporal y frecuencial (Task Force, 1996) y Variables Independientes o Factores de clasificación.

Parámetros	Otras nomenclaturas	Unidades	Niveles	Definición
<i>Variables de VFC para el análisis en el dominio temporal y frecuencial</i>				
RRi	<i>NN</i>	<i>ms</i>		Media de todos los intervalos RR del período medido
SDNN	<i>SD, SDRR</i>	<i>ms</i>		Desviación Estándar de todos los intervalos RR del período medido
RMSSD	<i>r-MSSD</i> <i>rMSSD</i>	<i>ms</i>		Raíz cuadrada de la media de la suma de las diferencias al cuadrado de todos los intervalos RR sucesivos
HF Power	<i>Frecuencia alta</i>	<i>ms⁻²</i>		Potencia en el rango de las altas frecuencias (0,15-0,40 Hz)
LF Power	<i>Frecuencia baja</i>	<i>ms⁻²</i>		Potencia en el rango de las bajas frecuencias (0,04-0,15 Hz)
LF / HF		<i>%</i>		Ratio o Proporción entre LF (ms) / HF (ms)
<i>Factores de clasificación</i>				
LESIÓN MEDULAR			Sí ó NO	Factor que distribuye la muestra en 2 grupos: <i>Grupo A</i> , incluye a las personas con tetraplejia y <i>Grupo B</i> , incluye a las personas sin LM.
TIEMPO			1 – 2 – 3	Factor que define el tiempo cuando se tomaron los registros de VFC. 1: <i>PRE</i> (registro basal), 2: <i>POST 5 min</i> (registro tomado durante los primeros 5 minutos de la recuperación), 3: <i>POST 10 min</i> (registro tomado durante los 10 minutos de la recuperación).

2. *Material y Método*

2.3.3. Control de las condiciones del experimento

Para reducir la variabilidad debida a factores ajenos a los manipulados durante la experimentación, se controlaron los siguientes elementos:

- Lugar de realización del test: Todas las pruebas se realizaron en el mismo laboratorio, con condiciones ambientales (luminosidad, sonoridad, temperatura y humedad) similares y controladas.
- Nivel de actividad física: Ambos grupos se constituyeron con personas físicamente activas y que no practicaran deporte de forma reglada.
- Hora de la prueba: Todos los participantes realizaron la misma prueba, en la misma franja horaria (entre las 16:00 y las 18:00 horas) y en el mismo orden.

2.4. Desarrollo del experimento

Los registros de las mediciones se realizaron entre abril y julio de 2011, en el laboratorio de Biomecánica de la Facultad de Ciencias de la Actividad Física y del Deporte de la Universidad de Valencia. El orden en la medición de los participantes fue aleatorio.

Se controló la medición de las variables en el registro basal debido a que todos los participantes lo realizaron en el mismo lugar y a la misma hora (16:00h a 18:00h). Así mismo, todos los participantes realizaron el ejercicio inmediatamente después al registro basal.

Para cada uno de los registros realizados los protocolos de actuación fueron los mismos, dividiéndose en 5 fases:

- Fase 1: Se cita al participante con día y hora determinada (entre las 16:00 y las 18:00 horas).
- Fase 2: Se informa de las características del estudio, se aplica una anamnesis para el registro de datos, se les instrumenta con una banda-sensor (T61, Polar Electro, Kempele, Finland) a nivel del pectoral.

2. Material y Método



Figura 1: Instrumentación con banda-sensor.

- Fase 3: Se registra la señal de FC basal en modo “latido a latido”, en reposo y durante 10 minutos. Se realiza en condiciones ambientales estandarizadas de baja luminosidad y con temperatura ambiental de 22 °C, para mantener una situación de tranquilidad y relajación durante todo el registro. A los participantes sin LM, se les hace el registro sentados y cercados con un paraban. A las personas con LM se les registró en la misma zona, sentados en su propia silla de ruedas, cuidándose que las mediciones se hicieran con la vejiga lo más vacía posible y que el participante no tuviera ningún elemento que le pudiera comprimir o presionar, para evitar una respuesta de disreflexia autonómica que pudiese afectar a la respuesta cardíaca.

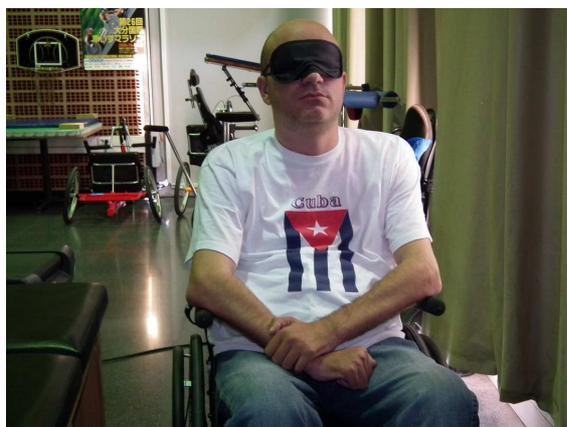


Figura 2: Registro de la FC basal.

- Fase 4: Desarrollo del Ejercicio. Tras realizar un breve calentamiento de 3 minutos con cicloergómetro de brazos SCIFIT PRO1 (SCIFIT Systems Inc, Tulsa, OK, USA), los participantes iniciaron un ejercicio fraccionado e incremental. Durante cada descanso, y tras completar el escalón, a cada participante se le tomaba la SaO₂ y se le pedía que valorasen la sensación de esfuerzo percibido en una escala de 0 a 10, siendo 0 equivalente a un esfuerzo “muy, muy ligero” y el valor de 10 un esfuerzo “muy, muy duro”. El ejercicio finalizaba cuando el participante no pudo completar el último escalón.



Figura 3: Registro de la FC durante la aplicación del ejercicio en cicloergómetro de brazos.

- Fase 5: Registro de la VFC durante la recuperación. Tras finalizar el ejercicio, se les dejó un tiempo de 2 minutos de recuperación en el lugar donde se realizó la prueba y a continuación se les trasladó a la zona de descanso. Una vez acomodados, se registraron 15 minutos para determinar la fase de recuperación de la FC. En este periodo se contemplaban las mismas condiciones ambientales que durante la medición de la FC basal.

2. Material y Método



Figura 4: Fase inicial de recuperación tras la finalización del ejercicio.

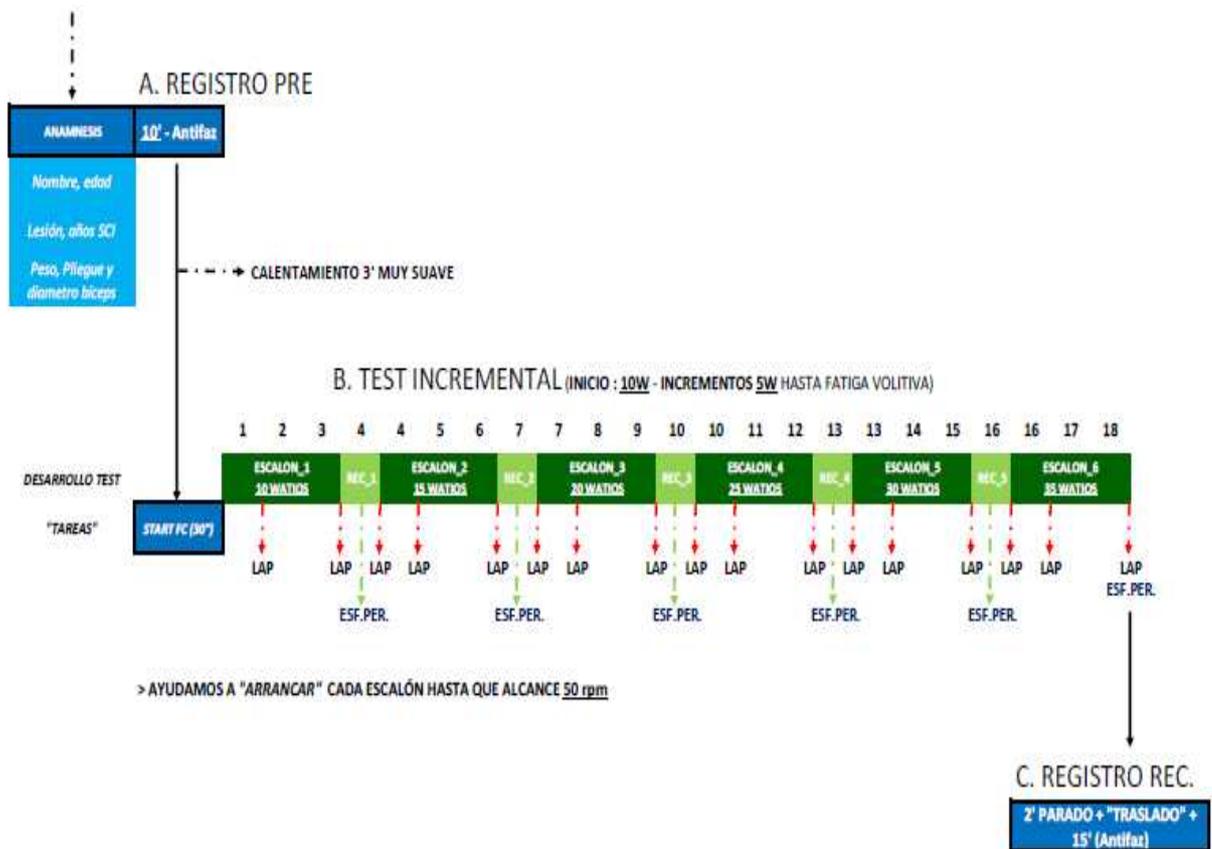


Figura 5: Protocolo experimental.

2.5. Instrumentos de medida

La señal de la FC fue registrada utilizando Polar RS800 HR (Polar Electro, Kempele, Finland) en modo de intervalo RR. Los registros se volcaron a un ordenador con la aplicación Polar Pro Trainer 5 software (Polar Electro, Kempele, Finland) a través de una interfase por infrarrojos (Polar IR).

2.6. Tratamiento de los datos

En el test, los datos de FC se fueron registrando en el polar fijando “3 laps”, al primer minuto de cada escalón, al finalizar el escalón y tras completar el minuto de descanso. Se diseñó una planilla para apuntar los datos correspondientes a la toma de SaO₂ y esfuerzo percibido de cada serie. Varios colaboradores se encargaban de transcribir los datos.

Los registros se volcaron a un ordenador y cada archivo descargado de intervalos R-R fue exportado luego como archivos *.txt.

Todos los datos fueron analizados con la aplicación Kubios HRV 2.0 (The Biomedical Signal and Medical Imaging Analysis Group, Department of Applied Physics, University of Kuopio, Finland) analizando los 5 minutos de la parte más limpia de la señal correspondiente a los 10 minutos del registro PRE (Registro Basal) con objetivo de asegurar la estabilidad de la señal cardíaca.

Así mismo, y de la misma forma, fueron calculados los parámetros de variabilidad para los registros de recuperación (1) y recuperación (2), seleccionando los 5 minutos correspondientes a los tramos más estables de la señal tras finalizar el test para uno de ellos.

Tras el filtrado de la señal y la corrección de los datos, de acuerdo a las recomendaciones del fabricante (Tarvainen & Niskanen, 2008), se realizó un análisis espectral utilizando como algoritmo la “transformada rápida de Fourier” (FFT). Se fijaron las bandas de frecuencia de acuerdo a las directrices más ampliamente aceptadas (Task Force, 1996): alta frecuencia (HF, 0,15-0,4 Hz) y baja frecuencia (LF, 0,04-0,15 Hz). La relación LF/HF también fue seleccionada para el análisis estadístico.

Para el dominio temporal, se calcularon la media de los intervalos RR normales (RRi), la desviación estándar de los intervalos RR normales (SDNN) y la diferencia de la raíz cuadrática de los intervalos normales RR sucesivos (rMSSD).

2.7. Análisis estadístico

Se llevo a cabo una ANOVA para las variables RRi, SDNN, rMSSD, HF Power, LF Power, LF/HF, incluyendo las variables LM y TIEMPO como factores de clasificación. Se fijó un nivel de significación Alfa de 0,05 y se completó con un Test de Rango Múltiple LSD (post hoc) para determinar las diferencias significativas entre los niveles del factor TIEMPO.

Para analizar la normalidad de la distribución de cada variable se utilizó el test de Kolmogorov-Smirnov. Al detectar datos sesgados o heteroscedásticos, como en el caso de las medidas espectrales, se transformaron obteniendo su logaritmo natural, lo cual permite comparaciones estadísticas paramétricas, al presentar una distribución normal (La Fountaine, Wecht, Spungen, & Bauman, 2010). Sin embargo, los resultados de estas variables se expresan en la forma original, con el fin de facilitar su comparación con otros estudios.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

Diferencias en el factor Lesión Medular

Para las variables SDNN, rMSSD, HF Power, LF Power, los valores medidos en el grupo sin LM (NO), resultaron estadísticamente mayores ($p < 0,05$) que los medidos en el grupo con LM (SI). Para las variables HF Power y LF Power se detectaron las mayores diferencias porcentuales entre los niveles SI y No.

Sin embargo las variables RRi y LF/HF no presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos (Tabla 3).

Diferencias en el factor TIEMPO

Se detectaron diferencias estadísticas ($p < 0,05$) para las variables RRi, SDNN, RMSSD, HF Power y LF Power. Las diferencias porcentuales más elevadas entre los niveles PRE, y POST 5 min - POST 10 min correspondieron a las variables HF Power y LF Power, siendo por lo general mayores las diferencias en POST 5 min para todas las variables estudiadas (Tabla 3).

No se encontraron diferencias significativas para la variable LF/HF.

Diferencias entre los niveles del factor tiempo

El Test de Rango Múltiple LSD mostró diferencias estadísticamente significativas entre los niveles 2 y 3, siempre frente al nivel 1 de la variable TIEMPO, para las variables RRi, SDNN, RMSSD, HF Power y LF Power, mientras que para LF/HF no se detectaron diferencias entre los niveles.

Interacción entre los factores

Se detectó una interacción estadísticamente significativa ($p < 0,05$) entre los factores LESIÓN MEDULAR y TIEMPO para las variables RRi, SDNN, RMSSD y HF Power.

2. *Material y Método*

Tabla 3: Resultados para las variables de VFC según los factores LESIÓN MEDULAR (Sí – No) y TIEMPO (PRE, POST 5 min, POST 10 min), así como la interacción entre los factores LESIÓN MEDULAR y TIEMPO.

VARIABLE	FACTOR										TRM	INTER	
	Lesión Medular					Tiempo							
	NO (Media ± SE)	SI (Media ± SE)	Dif % (No/Si)	p	PRE (Media ± SE)	POST 5 min (Media ± SE)	POST 10 min (Media ± SE)	Dif % (P5/Pre)	(P10/Pre)	p			p
RRi	ms	772,14 ± 17,71	776,9 ± 18,79	-1 %	0,8546	882,51 ± 22,36	711,48 ± 22,36	729,58 ± 22,36	-19 %	-17 %	0,0000 *	+	0,0152 *
SDNN	ms	39,25 ± 2,93	16,35 ± 3,10	140 %	0,0000 *	45,63 ± 3,70	17,96 ± 3,70	19,8 ± 3,70	-61 %	-57 %	0,0001 *	+	0,0147 *
RMSSD	ms	36,89 ± 4,08	13,60 ± 4,32	171 %	0,0006 *	44,26 ± 5,15	14,74 ± 5,15	16,72 ± 5,15	-67 %	-62 %	0,0002 *	+	0,0126 *
HF Power	ms ⁻²	1183,33 ± 326,27	83,21 ± 346,06	1322 %	0,0014 *	1557,08 ± 411,90	105,10 ± 411,90	237,64 ± 411,90	-93 %	-85 %	0,0013 *	+	0,0205 *
LF Power	ms ⁻²	1174,93 ± 202,75	182,37 ± 215,04	544 %	0,0001 *	1479,68 ± 255,95	232,96 ± 255,95	323,31 ± 255,95	-84 %	-78 %	0,0064 *	+	0,0531
LF/HF		4,10 ± 0,69	3,18 ± 0,73	29 %	0,7680	3,03 ± 0,87	3,80 ± 0,87	4,09 ± 0,87	25 %	35 %	0,2788		0,4007

TRM + indica diferencias estadísticamente significativas en el Test de Rango Múltiple.

Table of Least Squares Means for HFln with 95,0 Percent Confidence Intervals					
Level	Count	Mean	Std. Error	Lower Limit	Upper Limit
GRAND MEAN	51	4,53303			
Lesion					
0	27	5,24914	0,288917	4,66723	5,83105
1	24	3,81691	0,306443	3,1997	4,43411
Tiempo					
1	17	5,70004	0,36474	4,96542	6,43467
2	17	3,90225	0,36474	3,16762	4,63687
3	17	3,99678	0,36474	3,26216	4,73141
Lesion by Tiempo					
0 1	9	7,28381	0,500419	6,27591	8,29171
0 2	9	4,17844	0,500419	3,17054	5,18633
0 3	9	4,28519	0,500419	3,27729	5,29309
1 1	8	4,11628	0,530774	3,04724	5,18532
1 2	8	3,62606	0,530774	2,55702	4,6951
1 3	8	3,70838	0,530774	2,63934	4,77741
The StatAdvisor					
<p>This table shows the mean HFln for each level of the factors. It also shows the standard error of each mean, which is a measure of its sampling variability. The rightmost two columns show 95,0% confidence intervals for each of the means. You can display these means and intervals by selecting Means Plot from the list of Graphical Options.</p>					

Figura 6: Resultados de la interacción entre los factores TIEMPO y LESIÓN, para la variable HF Power.

(0 = Sin LM; 1 = Con LM)

3.2. Discusión de los resultados

De acuerdo con la literatura, las personas sanas tienen una alta VFC en reposo, aumentando cuando la FC es controlada principalmente por la actividad parasimpática (Tulppo et al., 2003; Yamamoto, Miyachi, Saitoh, Yoshioka, & Onodera, 2001), y esto mejora su capacidad de adaptación ante diferentes e impredecibles estímulos (Goldberger, 1990). Sin embargo, una gran variedad de factores pueden influir en la VFC, donde las más interesantes son la enfermedad y el ejercicio (De La Cruz Torres, López, & Orellana, 2008).

Las personas con tetraplejía tienen intacta las vías neuronales eferentes vagal y simpáticas dirigidas al nódulo sinusal, sin embargo, las neuronas simpáticas están desprovistas del control modulador y en particular de la inhibición de las entradas barorreflejas supraespinales (Teasell et al., 2000). Por esta razón,

3. Resultados y Discusión

presentan un modelo único con los que evaluar la contribución de los mecanismos supraespinales para determinar la actividad simpática (Task Force, 1996). De esta forma, poseen una menor VFC en reposo en comparación con las personas sin LM y muestran unas diferencias características en los valores del dominio temporal y frecuencial.

Se ha demostrado en personas sanas, que durante el ejercicio, una mala condición física se asocia a un deterioro de la función cardíaca vagal (Tulppo et al., 1998), con lo cual, los valores del análisis de tiempo y frecuencia quedarían disminuidos en comparación con personas que tuviesen mejor condición física.

La actividad del SNA en estas condiciones ha sido estudiada en función del momento y de la intensidad en el cual se recojan los datos. Diversos autores concluyen que, durante el inicio del ejercicio, el aumento inicial de la FC es producida por una retirada vagal, donde gradualmente va siendo inhibida en el ejercicio submáximo hasta llegar al nivel máximo de esfuerzo. Es en este momento donde la predominancia recae sobre la actividad simpática, produciendo la caída de la VFC (Alonso et al., 1998; Araújo et al., 1992; Nobrega & Arujo, 1993; Nurhayati & Boutcher, 1998).

La capacidad de recuperación inicial tras el esfuerzo resulta ser un valor predictivo muy interesante para medir la condición física mediante el análisis de la VFC (Cole et al., 1999), produciéndose un incremento de la actividad parasimpática, y un descenso de la actividad simpática (Pierpont et al., 2000), eso sí, en función de la intensidad en el que se finalice el ejercicio, donde la reactivación rápida vagal se produciría en intensidades bajas y medias, no siendo así en intensidades altas (Kaikkonen et al., 2007).

Observando los resultados obtenidos se puede concluir que las diferencias en cuanto a la regulación neural en ambos grupos son significativas, con lo que se corrobora que las personas con tetraplejia poseen puntuaciones mucho más bajas en comparación con personas sin LM.

De la misma forma se demuestra que para ambos grupos existen diferencias en cuanto al factor Tiempo. Las medidas PRE presentan valores muchos más elevados que las medidas POST 5 y POST 10, donde se puede comprobar que el ejercicio ejerce su influencia a la baja sobre la VFC. Se observa que por lo

general, la medida POST 10 presenta valores más elevados que POST 5, denotándose que la recuperación comienza a acercarse progresivamente a los valores basales.

La interacción significativa entre los factores TIEMPO y LESIÓN indica fundamentalmente que la gran diferencia en VFC, detectada entre las personas con y sin LM durante el reposo, se reduce considerablemente tras el ejercicio.

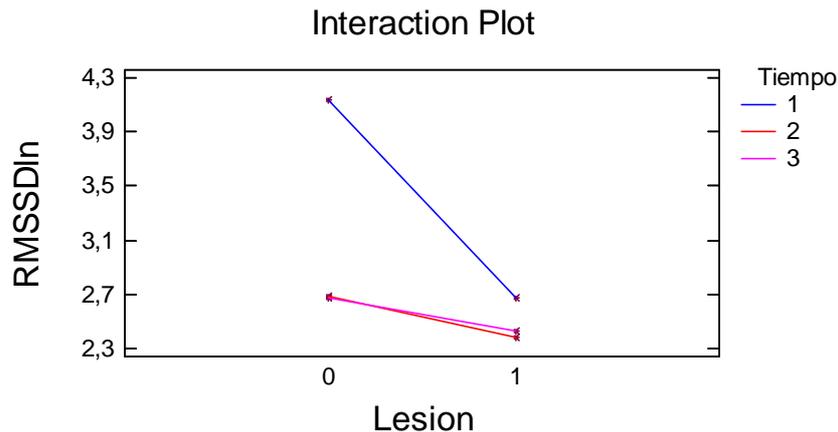


Figura 7: Interacción entre los factores TIEMPO Y LESIÓN, para la variable RMSSD.

(0 = Sin LM; 1 = Con LM)

Existen pocos estudios donde se hayan investigado los efectos del ejercicio físico sobre la VFC en personas con tetraplejia. No obstante, no se ha encontrado ninguno donde se haya investigado la VFC en la recuperación tras la realización de ejercicio aeróbico sobre personas con tetraplejia, con lo cual, describiremos minuciosamente los resultados obtenidos e intentaremos contrastar similitudes o diferencias con otras poblaciones.

Diferencias en la regulación autonómica sobre el factor Lesión Medular

Los resultados extraídos han demostrado las diferencias que existen entre personas con tetraplejia y personas sin LM. Se puede observar que, entre ambos grupos, la VFC presenta diferencias significativas en los indicadores SDNN, RMSD, HF Power y LF Power. Buntén et al. (1998), ya señalaron que mediante el análisis de la VFC se es capaz de distinguir entre personas con LM y sin LM, aportando que los patrones alterados pueden ser útiles para una

3. Resultados y Discusión

mayor caracterización de los cambios fisiológicos asociados a la LM en función del nivel de lesión.

Nuestros resultados en los registros basales, se asemejan a los obtenidos por Grimm et al. (1997), donde estudiaron los efectos de la función autonómica cardiovascular en la VFC. Las personas con tetraplejía obtuvieron registros más bajos en los componentes espectrales en comparación con el grupo control. Como se puede observar (tabla 3), podemos destacar que la diferencia porcentual en ambos grupos es de 1322 % y 544 % para la potencia de HF y LF respectivamente. Del mismo modo, no se observaron diferencias significativas en relación a la ratio LF/HF, de la misma forma que sucede en nuestro caso. Esta coherencia en relación a LF/HF sugiere que las dos divisiones autonómicas mantienen la homeostasis, incluso cuando una se ve gravemente comprometida (Bunten et al., 1998; Grimm et al., 1997).

Recientemente, en estudios donde se han puesto en práctica programas de entrenamiento para comprobar si las personas con tetraplejía son capaces de mejorar su regulación autonómica, se ha encontrado un incremento de la potencia espectral en LF y HF tras la realización de un programa de ejercicio (Brizuela Costa et al., 2010). Debido a que las personas con tetraplejía están desprovistas de inervación simpática eferente hacia el sistema cardiovascular (Bunten et al., 1998; Grimm et al., 1997), se ha sugerido que los cambios en los componentes de baja frecuencia (LF) de la VFC también podrían estar regulados por la rama parasimpática en esta población (Takahashi et al., 2007). Por ello se podría explicar los altos valores de la baja frecuencia (LF) en el registro basal que se observan en los resultados obtenidos en el grupo de personas con tetraplejía, más evidente todavía si se observa la recuperación tras el esfuerzo (POST 5 min y POST 10 min), llegándose incluso a aproximar los valores en ambos grupos.

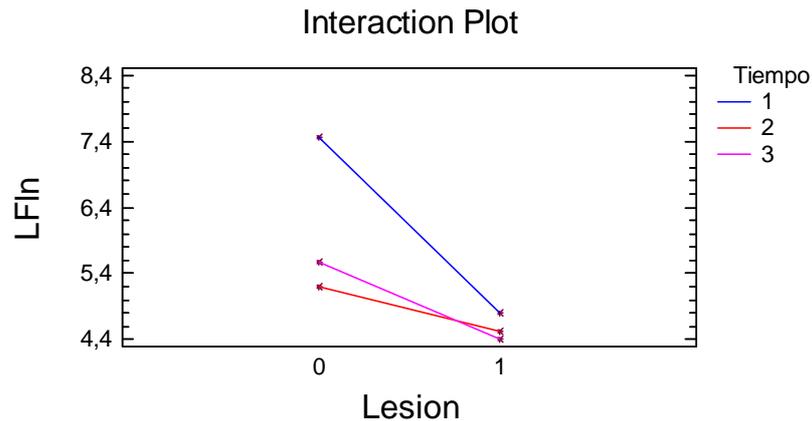


Figura 8: Interacción entre los factores TIEMPO Y LESIÓN, para la variable LF. (0 = Sin LM; 1 = Con LM)

Efecto del ejercicio sobre la regulación autonómica durante la recuperación en los momentos POST 5 min y POST 10 min en comparación al momento PRE

Los resultados revelan diferencias significativas en los tres momentos de registro para ambos grupos en las variables RRI, SDNN, rMSSD, HF Power y LF y LF Power, no siendo así en la ratio LF/HF. Se puede observar que la diferencia porcentual más elevada la posee con un 93% y un 84 % los indicadores del análisis espectral HF Power y LF Power respectivamente, en el momento inicial tras la cesación del ejercicio en comparación al momento PRE. Sin embargo, los registros tomados posteriormente (POST 10 min), revelan unas diferencias porcentuales menores con un 85% y 78% para los mismos indicadores, lo cual quiere decir que la reactivación vagal en este instante es mayor (Tabla 3).

Las comparaciones de HF Power en ambos grupos en función del tiempo, demuestra diferencias evidentes en cada momento. Se puede observar que las personas sin LM obtienen una puntuación media de $7,28 \pm 0,50$ en el momento PRE, frente a un $4,11 \pm 0,53$ en personas con tetraplejía. Sin embargo, tras la realización del test y en la recuperación Post 5 min, los valores tienden a equipararse en ambos grupos $4,18 \pm 0,59$ (Sin) frente a $3,62 \pm 0,53$ (Con) (Figura 6). Las personas con tetraplejía, al estar desprovistas de las vías simpáticas alcanzan menores niveles en los índices de HF Power que las

3. Resultados y Discusión

personas sin LM, sin embargo, se puede deducir que los en datos obtenidos en la recuperación existe la tendencia a la reactivación vagal en ambos grupos. Observando los resultados obtenidos en el momento POST 10 min, los valores más altos con respecto al momento POST 5, demuestra que esta tendencia sigue en aumento (Figura 9).

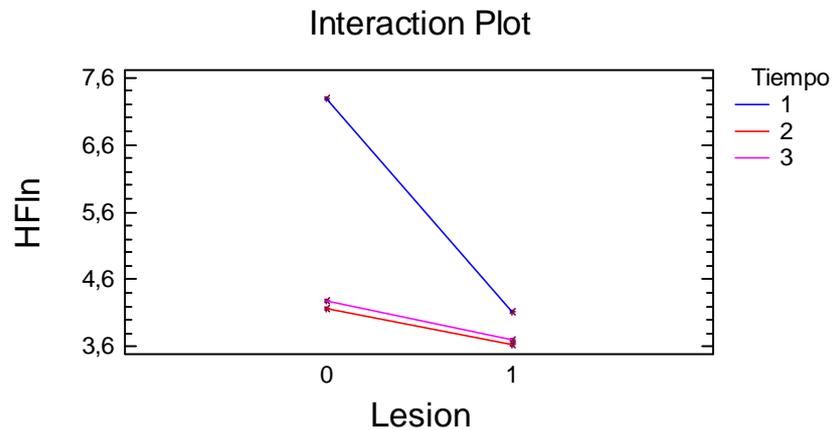


Figura 9: Interacción entre los factores TIEMPO Y LESIÓN, para la variable HF Power. (0 = Sin LM; 1 = Con LM)

Esto puede significar que según las hipótesis lanzadas, se demuestran las evidentes diferencias entre ambos grupos para cada medición de la VFC, en los diferentes momentos del factor TIEMPO. Aún así, la tendencia a que los valores de cada variable analizada se equiparen en los momentos POST 5 y POST 10 en ambos grupos, puede ser motivo de que las personas con tetraplejia también poseen la capacidad de que exista una reactivación vagal tras la realización de un esfuerzo incremental mediante el pedaleo de brazos.

4. CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones de resultados

En primer lugar, se ha podido comprobar que las personas con tetraplejia son capaces de producir adaptaciones positivas y relevantes en su regulación cardíaca autonómica tras practicar ejercicio de pedaleo de brazos. Se puede concluir que, al igual que las personas sin LM, son capaces de realizar una reactivación vagal tras el ejercicio.

En segundo lugar, aunque los picos de FC máxima que llegan a alcanzar durante el ejercicio están muy por debajo de los valores que alcanzan personas sin LM, debido a la mencionada descentralización simpática, dentro de la particularidad de cada tipo de lesión y de la condición física previa de cada persona, se ha podido comprobar que su capacidad de recuperación tras el esfuerzo es satisfactoria y equiparable al de personas sin LM.

4.2. Conclusiones metodológicas

Tras observar los resultados obtenidos se podría afirmar que el análisis de la VFC sería una excelente herramienta para valorar la capacidad de recuperación de las personas con tetraplejia. Por el contrario, la disminución retardada de la FC durante el primer minuto de recuperación tras el ejercicio (incluso hasta los 5 minutos) sería un poderoso predictor de mortalidad.

Podría concluirse que el análisis de la recuperación tras el esfuerzo en personas con tetraplejia mediante la VFC, podría ser una excelente técnica para valorar su salud. De este modo podría conocerse los niveles de regulación que ejerce el sistema nervioso autónomo sobre el corazón en la fase de recuperación tras el esfuerzo, obteniendo así un poderoso predictor de salud.

4.3. Limitaciones y futuras líneas de investigación

A pesar de que el estudio se ha llevado a cabo con una población sumamente especial, para futuras investigaciones sería recomendable contar con una muestra mayor. De esta forma, se aumentaría la potencia estadística del

4. Conclusiones

estudio y su capacidad de predicción, generalización y validez de los resultados.

Del mismo modo podría incrementarse el número de variables a analizar. La VFC puede analizarse mediante métodos no-lineales que aportan una gran información sobre lo que le sucede al ritmo cardíaco, pero dada su complejidad se requiere gran experiencia para ello. Aún así, de las variables tratadas en el presente estudio, también hubiese sido posible extraer más resultados estableciendo correlaciones o asociaciones entre variables, entre factores o entre los mismos niveles de cada factor, obteniendo así otros tipos de resultados.

Para mayor precisión en el tratamiento de la señal y recogida de datos, existen en el mercado otros tipos de sistemas mucho más precisos y avanzados que el utilizado en el presente estudio. Es el caso por ejemplo del Omega Wave System, donde se ha demostrado una mayor precisión y nitidez en el registro de la señal que el Polar RS800 HR, disminuyendo así el número de artefactos o ruido. Esto facilitaría y daría mayor rapidez y precisión a los registros, mejorando la calidad del proceso (Parrado et al., 2010). El problema es que es un instrumental sumamente costoso.

Se han detectado algunas posibles mejoras que hubieran dado mayor calidad al trabajo. Una de ellas es, por ejemplo, la comparativa de la VFC durante el ejercicio, o la relación entre el pico de FC máxima alcanzado en el test incremental con la recuperación, mediante el análisis de su estado simpático-vagal. Este análisis no ha sido posible a consecuencia del excesivo número de artefactos detectados en la señal.

Otra posible mejora sería haber realizado un control más exhaustivo del proceso, tratando de controlar la muestra, por ejemplo, realizando una clasificación por edades, por nivel y tipo de lesión de acuerdo con la escala de ASIA (American Spinal Injuries Association), aunque esto requeriría, evidentemente, de un mayor número de participantes.

Queda de este modo una línea de investigación abierta, en la cual conviene dar continuidad a la creación de conocimiento para mejorar así las actuaciones de los profesionales sobre este tipo de población. Hasta la fecha muy pocos

estudios se han realizado con personas con tetraplejia en relación a la actividad física y su condición cardiocirculatoria, del sistema nervioso, del sistema respiratorio o del aparato locomotor, en comparación a otros tipos de poblaciones especiales. Es evidente, que todas las personas tienen derecho a disfrutar de actividades con total seguridad. Por ello, se crea la necesidad de avanzar en los conocimientos que hasta la fecha se poseen y se ha comprobado que el análisis de la VFC es un buen instrumento para ello.

El siguiente paso, y como sugerencia para otros investigadores, podría ser analizar la respuesta cardíaca ante diferentes intensidades de esfuerzo mediante el uso de la VFC, con el posible establecimiento de zonas de entrenamiento en función de la condición física, así como de las respuestas circulatorias, o la utilización de métodos de entrenamiento de fuerza, como por ejemplo la electroestimulación u otros.

En lo personal, queda un campo de estudio abierto en el cual y si me es posible, intentaré seguir profundizando para desarrollar mi tesis doctoral. Aparte de que es evidente la falta de documentación científica en este ámbito, considero que hay una necesidad importante de mejorar la calidad de vida de las personas con LM y en especial de las personas con tetraplejia.

4. Conclusiones

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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(4504), 220-222.
- Alonso, D. O., Forjaz, C. L. M., Rezende, L. O., Braga, A. M. F. W., Barretto, A. C. P., Negrão, C. E., et al. (1998). Comportamento da frequência cardíaca e da sua variabilidade durante as diferentes fases do exercício físico progressivo máximo; Heart rate response and its variability during different phases of maximal graded exercise. *Arq. bras. cardiol*, 71(6), 787-792.
- Araújo, C., Nóbrega, A., & Castro, C. (1992). Heart rate responses to deep breathing and 4-seconds of exercise before and after pharmacological blockade with atropine and propranolol. *Clinical Autonomic Research*, 2(1), 35-40.
- Barrera García, R. C., & Gonçalves De Abreu, K. (2009). Comportamiento de la Frecuencia Cardíaca en Test Progresivos: Algunas Variables a Considerar. *Educación física Chile*(268), 63-69.
- Berntson, G. G. (1997). Heart rate variability: origins, methods, and interpretive caveats. *Psychophysiology*, 34(6), 623-648.
- Bizzarini, E., Saccavini, M., Lipanje, F., Magrin, P., Malisan, C., & Zampa, A. (2005). Exercise prescription in subjects with spinal cord injuries. *Arch Phys Med Rehabil*, 86(6), 1170-1175.
- Brizuela Costa, G., Sinz, S., Aranda Malavés, R., & Martínez Navarro, I. (2010). Efecto del pedaleo de brazos sobre el sistema cardiorrespiratorio de las personas con tetraplejia. *Revista Internacional de Ciencias del Deporte= International Journal of Sport Science*, 6(21), 297-310.
- Bunten, D. C., Warner, A. L., Brunemann, S. R., & Segal, J. L. (1998). Heart rate variability is altered following spinal cord injury. *Clinical Autonomic Research*, 8(6), 329-334.
- Claydon, V. E., Hol, A. T., Eng, J. J., & Krassioukov, A. V. (2006). Cardiovascular responses and postexercise hypotension after arm cycling exercise in subjects with spinal cord injury. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 87(8), 1106-1114.

5. Referencias Bibliográficas

- Claydon, V. E., & Krassioukov, A. V. (2006). Orthostatic hypotension and autonomic pathways after spinal cord injury. *J Neurotrauma*, 23(12), 1713-1725.
- Claydon, V. E., Steeves, J. D., & Krassioukov, A. (2006). Orthostatic hypotension following spinal cord injury: understanding clinical pathophysiology. *Spinal Cord*, 44(6), 341-351.
- Cole, C. R., Blackstone, E. H., Pashkow, F. J., Snader, C. E., & Lauer, M. S. (1999). Heart-rate recovery immediately after exercise as a predictor of mortality. *New England Journal of Medicine*, 341(18), 1351-1357.
- Chicharro, J. L. (2008). *Fisiología Clínica del Ejercicio*: Medica Panamencana.
- Chicharro, J. L., Vaquero, A. F., & Arce, J. C. L. (2003). *Fisiología del ejercicio*: Médica Panamericana.
- Dallmeijer, A. J., van der Woude, L. H., Hollander, A. P., & van As, H. H. (1999). Physical performance during rehabilitation in persons with spinal cord injuries. *Med Sci Sports Exerc*, 31(9), 1330-1335.
- Dallmeijer, A. J., Zentgraaff, I. D., Zijp, N. I., & van der Woude, L. H. (2004). Submaximal physical strain and peak performance in handcycling versus handrim wheelchair propulsion. *Spinal Cord*, 42(2), 91-98.
- Davis, G. M. (1993). Exercise capacity of individuals with paraplegia. *Med Sci Sports Exerc*, 25(4), 423-432.
- De La Cruz Torres, B., López, C. L., & Orellana, J. N. (2008). Analysis of heart rate variability at rest and during aerobic exercise: a study in healthy people and cardiac patients. *British journal of sports medicine*, 42(9), 715.
- Ditor, D., Macdonald, M., Kamath, M., Bugaresti, J., Adams, M., McCartney, N., et al. (2005). The effects of body-weight supported treadmill training on cardiovascular regulation in individuals with motor-complete SCI. *Spinal Cord*, 43(11), 664-673.
- Ditor, D. S., Kamath, M. V., MacDonald, M. J., Bugaresti, J., McCartney, N., & Hicks, A. L. (2005a). Effects of body weight-supported treadmill training on heart rate variability and blood pressure variability in individuals with spinal cord injury. *Journal of Applied Physiology*, 98(4), 1519.
- Ditor, D. S., Kamath, M. V., MacDonald, M. J., Bugaresti, J., McCartney, N., & Hicks, A. L. (2005b). Reproducibility of heart rate variability and blood pressure variability in individuals with spinal cord injury. *Clinical Autonomic Research*, 15(6), 387-393.

- Eckberg, D. L. (1997). Sympathovagal balance: a critical appraisal. *Circulation*, 96(9), 3224.
- Figoni, S. F. (1993). Exercise responses and quadriplegia. *Med Sci Sports Exerc*, 25(4), 433-441.
- Gamelin, F. X., Berthoin, S., & Bosquet, L. (2006). Validity of the polar S810 heart rate monitor to measure RR intervals at rest. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 38(5), 887.
- Glaser, R. M. (1989). Arm exercise training for wheelchair users. *Med Sci Sports Exerc*, 21(5 Suppl), S149-157.
- Goldberger, A. L. (1990). Fractal Electrodynamics of the Heartbeats. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 591(1), 402-409.
- Grimm, D. R., De Meersman, R. E., Almenoff, P. L., Spungen, A., & Bauman, W. A. (1997). Sympathovagal balance of the heart in subjects with spinal cord injury. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 272(2), H835.
- Guttmann, L. (1981). Lesiones medulares. Tratamiento global e investigación. Barcelona: Ed. JIMS.
- Hicks, A. L., Martin, K. A., Ditor, D. S., Latimer, A. E., Craven, C., Bugaresti, J., et al. (2003). Long-term exercise training in persons with spinal cord injury: effects on strength, arm ergometry performance and psychological well-being. *Spinal Cord*, 41(1), 34-43.
- Hopman, M. T., Groothuis, J. T., Flendrie, M., Gerrits, K. H., & Houtman, S. (2002). Increased vascular resistance in paralyzed legs after spinal cord injury is reversible by training. *J Appl Physiol*, 93(6), 1966-1972.
- Jacobs, P. L., & Mahoney, E. T. (2002). Peak exercise capacity of electrically induced ambulation in persons with paraplegia. *Med Sci Sports Exerc*, 34(10), 1551-1556.
- Jae, S. Y., Heffernan, K. S., Lee, M., & Fernhall, B. (2010). Relation of heart rate recovery to heart rate variability in persons with paraplegia. *Clinical Autonomic Research*, 1-6.
- Kaikkonen, P., Nummela, A., & Rusko, H. (2007). Heart rate variability dynamics during early recovery after different endurance exercises. *European journal of applied physiology*, 102(1), 79-86.
- Kalincik, T., Jozefcikova, K., Waite, P. M., & Carrive, P. (2009). Local response to cold in rat tail after spinal cord transection. *J Appl Physiol*, 106(6), 1976-1985.
- Karlsson, A. K. (1999). Autonomic dysreflexia. *Spinal Cord*, 37(6), 383-391.

5. Referencias Bibliográficas

- Kleiger, R. E., Stein, P. K., & Bigger, J. T., Jr. (2005). Heart rate variability: measurement and clinical utility. *Ann Noninvasive Electrocardiol*, *10*(1), 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*(3), 363-374.
- Linn, W. S., Spungen, A. M., Gong, H., Jr., Adkins, R. H., Bauman, W. A., & Waters, R. L. (2001). Forced vital capacity in two large outpatient populations with chronic spinal cord injury. *Spinal Cord*, *39*(5), 263-268.
- Malik, M. (1997). Time-domain measurement of heart rate variability. *Cardiac Electrophysiology Review*, *1*(3), 329-334.
- Malik, M., Bigger, J. T., Camm, A. J., Kleiger, R., Malliani, A., Moss, A., et al. (1996). Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology. Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use. *Circulation*, *93*(5), 1043.
- McLachlan, E. M. (2007). Diversity of sympathetic vasoconstrictor pathways and their plasticity after spinal cord injury. *Clinical Autonomic Research*, *17*(1), 6-12.
- 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*, *150*(1-2), 116-121.
- Myers, J., Lee, M., & Kiratli, J. (2007a). Cardiovascular disease in spinal cord injury: an overview of prevalence, risk, evaluation, and management. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, *86*(2), 142.
- Myers, J., Lee, M., & Kiratli, J. (2007b). Cardiovascular disease in spinal cord injury: an overview of prevalence, risk, evaluation, and management. *Am J Phys Med Rehabil*, *86*(2), 142-152.
- Nash, M. S. (1994). Immune responses to nervous system decentralization and exercise in quadriplegia. *Med Sci Sports Exerc*, *26*(2), 164-171.
- Nash, M. S. (2005). Exercise as a health-promoting activity following spinal cord injury. *Journal of Neurologic Physical Therapy*, *29*(2), 87.

- Nash, M. S., Bilsker, S., Marcillo, A. E., Isaac, S. M., Botelho, L. A., Klose, K. J., et al. (1991). Reversal of adaptive left ventricular atrophy following electrically-stimulated exercise training in human tetraplegics. *Paraplegia*, 29(9), 590-599.
- Niskanen, J. (2004). Software for advanced HRV analysis. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 76(1), 73-81.
- Nobrega, A. C. L., & Arujo, C. (1993). Heart rate transient at the onset of active and passive dynamic exercise. *Medicine and science in sports and exercise*, 25, 37-37.
- Noreau, L., & Shephard, R. J. (1995). Spinal cord injury, exercise and quality of life. *Sports Med*, 20(4), 226-250.
- Nurhayati, Y., & Boutcher, S. H. (1998). Cardiovascular response to passive cycle exercise. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 30(2), 234.
- Ortis, L. C., Font, G. R., Mariné, M. O., Romero, E. P., Bassets, M. P., & Herreros, M. V. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca como indicador de salud en el deporte: validación con un cuestionario de calidad de vida (SF-12). *Apunts. Medicina de l'Esport*, 43(158), 62-69.
- Otis, C. L., Drinkwater, B., Johnson, M., Loucks, A., & Wilmore, J. (1997). American College of Sports Medicine position stand. The Female Athlete Triad. *Medicine and science in sports and exercise*, 29(5), i.
- Parrado, E., García, M., Ramos, J., Cervantes, J., Rodas, G., & Capdevila, L. (2010). Comparison of Omega Wave System and Polar S810i to Detect RR Intervals at Rest. *International journal of sports medicine*, 31(5), 336.
- Phillips, W. T., Kiratli, B. J., Sarkarati, M., Weraarchakul, G., Myers, J., Franklin, B. A., et al. (1998). Effect of spinal cord injury on the heart and cardiovascular fitness. *Current problems in cardiology*, 23(11), 641-716.
- Pierpont, G. L., Stolpman, D. R., & Gornick, C. C. (2000). Heart rate recovery post-exercise as an index of parasympathetic activity. *Journal of the autonomic nervous system*, 80(3), 169-174.
- Pumprija, J., Howorka, K., Groves, D., Chester, M., & Nolan, J. (2002). Functional assessment of heart rate variability: physiological basis and practical applications. *Int J Cardiol*, 84(1), 1-14.

5. Referencias Bibliográficas

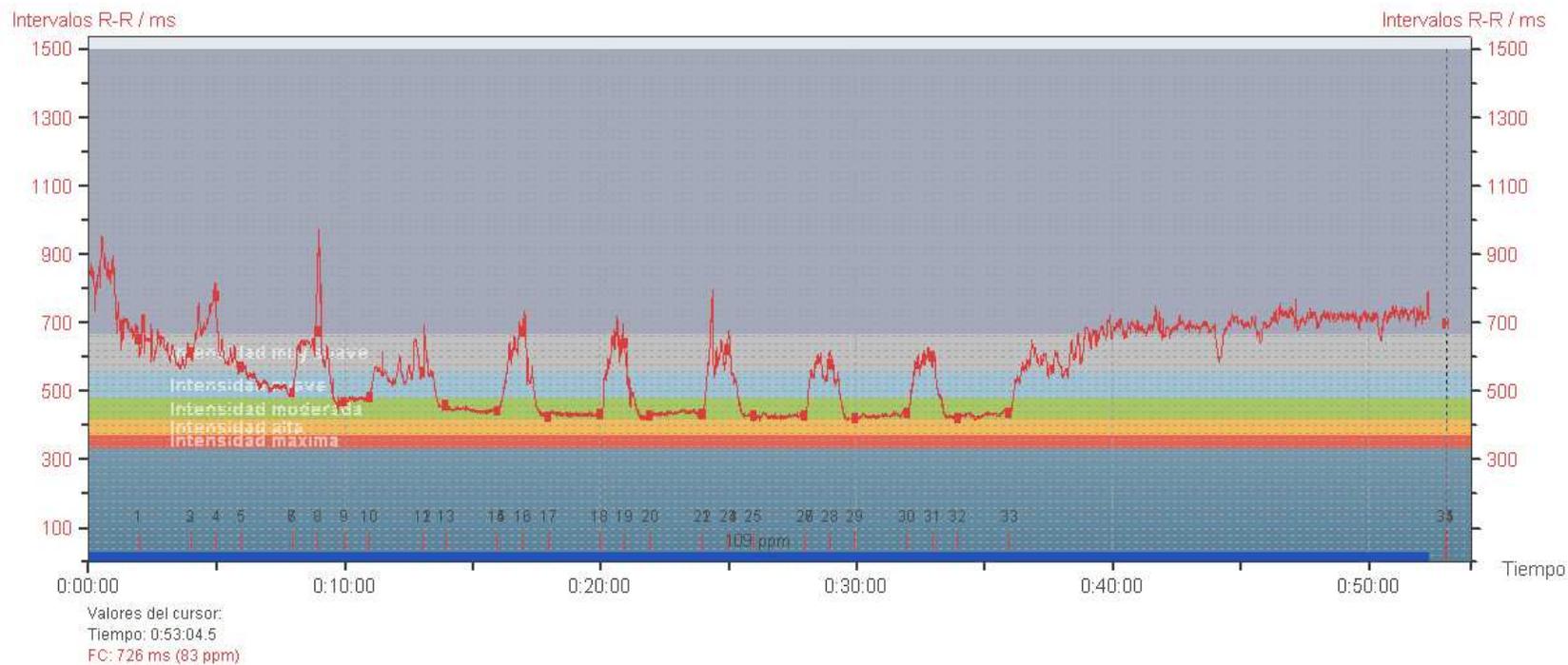
- Rocchetti, M., Malfatto, G., Lombardi, F., & Zaza, A. (2000). Role of the input/output relation of sinoatrial myocytes in cholinergic modulation of heart rate variability. *Journal of cardiovascular electrophysiology*, 11(5), 522-530.
- Rodas, G., Pedret Carballido, C., Ramos, J., & Capdevila, L. (2008). Variabilidad de la frecuencia cardíaca: concepto, medidas y relación con aspectos clínicos (I). *Archivos de medicina del deporte: revista de la Federación Española de Medicina del Deporte y de la Confederación Iberoamericana de Medicina del Deporte*(123), 41-48.
- Schmid, A., Huonker, M., Barturen, J. M., Stahl, F., Schmidt-Trucksass, A., Konig, D., et al. (1998). Catecholamines, heart rate, and oxygen uptake during exercise in persons with spinal cord injury. *J Appl Physiol*, 85(2), 635-641.
- Takahashi, M., Matsukawa, K., Nakamoto, T., Tsuchimochi, H., Sakaguchi, A., Kawaguchi, K., et al. (2007). Control of heart rate variability by cardiac parasympathetic nerve activity during voluntary static exercise in humans with tetraplegia. *Journal of Applied Physiology*, 103(5), 1669.
- Takahashi, M., Sakaguchi, A., Matsukawa, K., Komine, H., Kawaguchi, K., & Onari, K. (2004). Cardiovascular control during voluntary static exercise in humans with tetraplegia. *J Appl Physiol*, 97(6), 2077-2082.
- Tapanainen, J. M., Thomsen, P. E. B., Køber, L., Torp-Pedersen, C., Mäkikallio, T. H., Still, A. M., et al. (2002). Fractal analysis of heart rate variability and mortality after an acute myocardial infarction* 1. *The American journal of cardiology*, 90(4), 347-352.
- Tarvainen, M. P., & Niskanen, J. P. (2008). Kubios HRV.
- Teasell, R. W., Arnold, J. M., Krassioukov, A., & Delaney, G. A. (2000). Cardiovascular consequences of loss of supraspinal control of the sympathetic nervous system after spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil*, 81(4), 506-516.
- Ter Woerds, W., De Groot, P. C. E., van Kuppevelt, D. H. J. M., & Hopman, M. T. E. (2006). Passive leg movements and passive cycling do not alter arterial leg blood flow in subjects with spinal cord injury. *Physical therapy*, 86(5), 636.
- Tulppo, M. P., Hautala, A. J., Mäkikallio, T. H., Laukkanen, R. T., Nissilä, S., Hughson, R. L., et al. (2003). Effects of aerobic training on heart rate dynamics in sedentary subjects. *Journal of Applied Physiology*, 95(1), 364.

- Tulppo, M. P., Mäkikallio, T. H., Seppänen, T., Laukkanen, R. T., & Huikuri, H. V. (1998). Vagal modulation of heart rate during exercise: effects of age and physical fitness. *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology*, 274(2), H424.
- Valent, L. J., Dallmeijer, A. J., Houdijk, H., Slootman, H. J., Janssen, T. W., Post, M. W., et al. (2009). Effects of hand cycle training on physical capacity in individuals with tetraplegia: a clinical trial. *Phys Ther*, 89(10), 1051-1060.
- Vidal, J., Javierre, C., Segura, R., Lizarraga, A., Barbany, J. R., & Perez, A. (2003). Physiological adaptations to exercise in people with spinal cord injury. *J Physiol Biochem*, 59(1), 11-18.
- Wang, Y. H., Huang, T. S., Lin, J. L., Hwang, J. J., Chan, H. L., Lai, J. S., et al. (2000). Decreased autonomic nervous system activity as assessed by heart rate variability in patients with chronic tetraplegia. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 81(9), 1181-1184.
- Wong, S. S. D., & Warburton, D. E. R. (2010). Hybrid Exercise Rehabilitation in Persons with Spinal Cord Injuries: A Brief Review. *The Health & Fitness Journal of Canada*, 1(1), 30-35.
- Yamamoto, K., Miyachi, M., Saitoh, T., Yoshioka, A., & Onodera, S. (2001). Effects of endurance training on resting and post-exercise cardiac autonomic control. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 33(9), 1496.
- Yamasaki, M., Kim, K. T., Choi, S. W., Muraki, S., Shiokawa, M., & Kurokawa, T. (2001). Characteristics of body heat balance of paraplegics during exercise in a hot environment. *Journal of physiological anthropology and applied human science*, 20(4), 227-232.

5. *Referencias Bibliográficas*

6. ANEXOS

6.1. Modelo de informe Polar Pro Trainer 5 Software



Persona	José Luis Romero	Fecha		Frecuencia cardíaca	109 ppm		
Ejercicio	Luis Doramas 2011 04 18 Test	Hora	18:40:41	Frecuencia cardíaca	145 ppm		
Deporte	Carreras	Duración	0:53:04.4				
Nota	TEST: Luis Dormas			Selección	0:00:01 - 0:52:23 (0:52:23)		

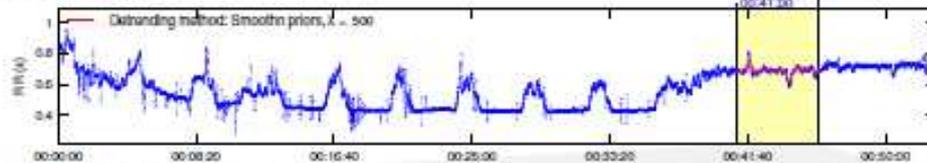
6.2. Modelo de informe de Kubios HRV 2.0

HRV Analysis Results

LUIS DORAMAS TEST.txt - xxxxxx - xxxxxx

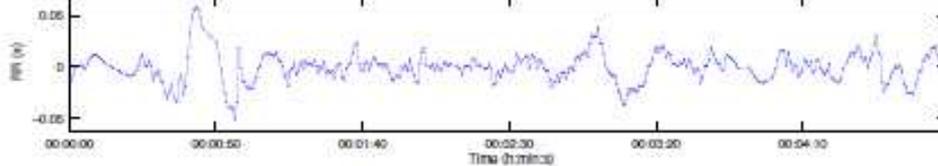
Page 1/1

RR Interval Time Series



Results for a single sample

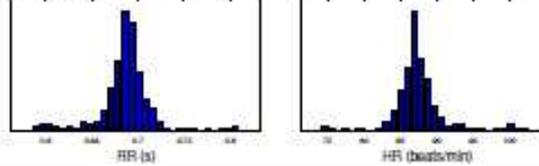
Selected Detrended RR Series



Time-Domain Results

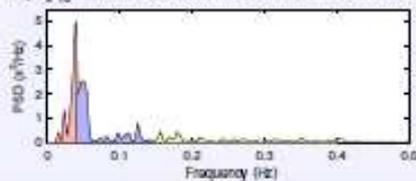
Variable	Units	Value
Mean RR*	(ms)	666.1
STD RR (SDNN)	(ms)	14.4
Mean HR*	(1/min)	87.61
STD HR	(1/min)	3.67
RMSD	(ms)	7.4
NN50	(count)	1
pNN50	(%)	0.2
RR triangular index		3.083
TINN	(ms)	75.0

Distributions*



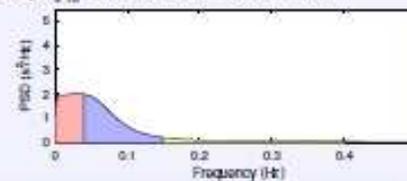
Frequency-Domain Results

FFT spectrum# Welch's periodogram: 256 s window with 50% overlap



Frequency Band	Peak (Hz)	Power (ms ²)	Power (%)	Power (n.u.)
VLF (0-0.04 Hz)	0.0391	36	32.6	
LF (0.04-0.15 Hz)	0.0508	57	50.4	74.2
HF (0.15-0.4 Hz)	0.1563	30	17.6	25.8
Total		113		
LF/HF		2.873		

AR Spectrum# (AR model order = 16, not factorized)

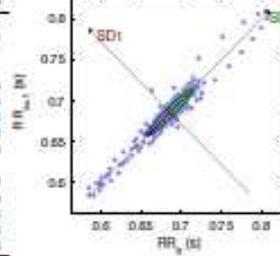


Frequency Band	Peak (Hz)	Power (ms ²)	Power (%)	Power (n.u.)
VLF (0-0.04 Hz)	0.0352	77	38.9	
LF (0.04-0.15 Hz)	0.0430	102	51.9	84.9
HF (0.15-0.4 Hz)	0.1523	16	9.2	15.1
Total		197		
LF/HF		5.612		

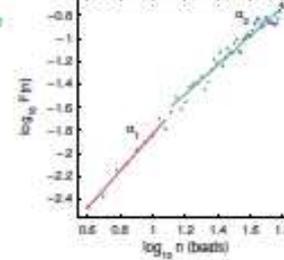
Nonlinear Results*

Variable	Units	Value
Poincaré plot		
SD1	(ms)	5.9
SD2	(ms)	40.7
Recurrence plot		
Mean line length (Lmean)	(beats)	32.88
Max line length (Lmax)	(beats)	400
Recurrence rate (REC)	(%)	67.04
Determinism (DET)	(%)	99.93
Shannon Entropy (ShanEnt)		4.175
Other		
Approximate entropy (ApEnt)		0.798
Sample entropy (SampEnt)		0.789
Detrended fluctuations (DFA):=1		1.296
Detrended fluctuations (DFA):=2		1.266
Correlation dimension (Dc)		0.246

Poincaré Plot



Detrended fluctuations (DFA)



*Results are calculated from the non-detrended selected RR series.