


VNIVERSITAT DE VALÈNCIA

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

PROGRAMA DE DOCTORADO CCAFV



Análisis de validez de un protocolo novel para la medición de la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

TESIS DOCTORAL

Presentada por:
Fco Javier Basterra Arroyo

Dirigida por:
Dr. Marco Romagnoli

Valencia, 2016

A MIS PADRES Y HERMANAS

A MIS SOBRINOS

Agradecimientos

A **Marco**, quien me introdujo en este apasionante aunque difícil mundo. Gracias por estar siempre ahí a pesar de mis idas y venidas, por tu fortaleza y creer en mí a veces incluso más que yo mismo. Gracias por ser más que un profesor.

A **Rafa Alís**. Gracias por todo, porque sin tus ganas de trabajar, innovar e ir siempre un poco más lejos, esto no hubiese sido posible. Gracias por todo el tiempo invertido en mí y en este trabajo. Y sobre todo, gracias por los momentos que pasamos juntos trabajando.

A mi familia:

A mis padres: **Javier** y **Loli**, por simplemente dármele todo. Por estar siempre aunque de un modo discreto, por aceptar mis decisiones confiando ciegamente en mí, por enseñarme el valor del trabajo bien hecho, del criticismo, la paciencia y la bondad. Espero que esto me reporte la felicidad que a veces me ha faltado, y a vosotros también. Gracias. Siempre.

A mis hermanas: **Bea, Marina y Estefanía**, por valorarme por quien soy. Por creer en mí y por todas las ayudas que me han prestado siempre. Porque sin vosotras mi camino hubiese tenido muchas más curvas y baches. Gracias.

A mis sobrinos: **Paz y Gabriel**, que con su simple presencia hacen que las cosas valgan la pena.

A todos los que han participado en nuestros trabajos de forma desinteresada:

Fabian, Alessandro, M^a Carmen, Begoña, Dani, Javi, Sheyla; a todas las personas que adoptaron el papel de “sujeto”.

A los profesionales que me han hecho aprender tanto de lo bueno como de lo malo en estos años de trabajo ligado a la investigación: **Weartech, Luís García del Moral, profesorado de la Universitat de València, GIBD, etc.**

A mis amigos:

A **Fran** porque siempre ha estado en los momentos más difíciles y me ha alentado a hacer aquello que nos realiza, ¡viva la vida! A **Josema**, porque a pesar de la distancia siempre hemos sabido mantenernos juntos. A **David**, por esos momentos que

nos han unido tanto y que espero continuar compartiendo contigo. A la *quadrilla*, que me han hecho ver lo afortunado que soy. A la familia Village, con los que he podido compartir aquello que más importante me ha sido. A todos ellos, gracias.

A todos aquellos que ya no comparten mi día a día. Gracias por haberme acompañado en mi camino hasta aquí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	24
GENERALIDADES DE LA FISIOLOGÍA DEL EJERCICIO	26
SISTEMA NERVIOSO	29
1. ESTRUCTURA Y FUNCIONES DEL SISTEMA NERVIOSO	30
1.1. Respuesta nerviosa autónoma.....	32
1.2. Respuesta nerviosa simpática.....	33
1.3. Respuesta nerviosa parasimpática	35
2. RESPUESTA AUTÓNOMA AL EJERCICIO	36
2.1. Respuestas cardio-respiratorias.....	37
2.2. Condicionantes de la respuesta autónoma al ejercicio.....	41
SISTEMA CIRCULATORIO.....	42
1. LOS VASOS SANGUÍNEOS	42
2. CORAZÓN	43
3. FRECUENCIA CARDÍACA.....	46
3.1. Frecuencia cardíaca en reposo	47
3.2. Frecuencia cardíaca durante el ejercicio.....	47
3.3. Estabilidad de la frecuencia cardíaca	50
3.4. Condicionantes de la frecuencia cardíaca.....	51
4. RESPUESTA CARDIOVASCULAR PERIFÉRICA AL EJERCICIO.....	54
5. TÉCNICAS DE MEDIDA DE LA ACTIVIDAD SIMPÁTICO-VAGAL ...	60
5.1. Concentración de catecolaminas en plasma.....	60
5.2. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca.....	62
5.3. Recuperación de la Frecuencia Cardíaca.....	64
5.3.1 Métodos de cálculo.....	65
5.3.2. Uso clínico de la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca ..	69
5.3.3. Efecto de la edad, el sexo y la raza sobre la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca	71
5.3.4. Recuperación de la Frecuencia Cardíaca como indicador de capacidad física	72
5.3.5. Efecto del ejercicio crónico sobre Recuperación de la Frecuencia Cardíaca.....	74
5.3.6. Efecto del ejercicio agudo sobre la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca.....	76
5.3.7. Efecto del tipo de ejercicio sobre la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca.....	79
5.3.8. Factores ambientales	82

TEST DE CAPACIDAD FÍSICA	84
1. CAPACIDAD AERÓBICA POR FRECUENCIA CARDÍACA	85
1.1. Test de Rockport (Test de la milla)	85
1.2. Test de Conconi	86
1.3. Test del índice de Ruffier	87
2. CAPACIDAD AERÓBICA POR LA VELOCIDAD	88
2.1. Test de Cooper (Test de los 12 minutos).....	88
2.2. Test de Course Navette (Test de Leger-Lambert).....	89
2.3. Test del kilómetro	91
3. CAPACIDAD AERÓBICA POR RECUPERACIÓN DE LA FRECUENCIA CARDÍACA.....	91
3.1. CAT-Test (Test de Chanon y Stephan)	92
3.2. Test de Zintl.....	92
4. NUEVOS MÉTODOS PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO	93
4.1. Performance Index.....	94
4.2. Test de 18 minutos (Arduini y cols.).....	94
MOTIVOS Y JUSTIFICACIÓN	101
OBJETIVOS	104
OBJETIVO PRINCIPAL	105
MATERIALES Y MÉTODOS	107
CRONOLOGÍA DE LAS DIVERSAS FASES	108
DISEÑO EXPERIMENTAL.....	109
1. FASE EXPERIMENTAL 1	112
1.1. Muestra	112
1.1.1. Criterios de inclusión	113
1.1.2. Criterios de exclusión.....	113
1.2. Protocolos de ejercicio	113
1.2.1. Test incremental máximo	114
1.2.2. Test de Recuperación de Frecuencia Cardíaca	115
1.3. Reducción de datos	116
1.4. Análisis estadístico.....	117
2. FASE EXPERIMENTAL 2	118
2.1. Muestra	118
2.1.1. Criterios de inclusión	119
2.1.2. Criterios de exclusión.....	119
2.2. Protocolo de ejercicio	119
2.2.1. Test incremental máximo	120
2.2.2. Test de Recuperación de Frecuencia Cardíaca	122
2.3. Protocolo de entrenamiento.....	123
2.4. Reducción de datos.....	124

2.5. Análisis estadístico.....	124
2.6. Propuesta de parámetros noveles	125
RESULTADOS	126
RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL 1.....	128
RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL 2.....	134
1. RESULTADOS DE PARÁMETROS NOVELES PROPUESTOS.....	146
DISCUSIÓN	151
FASE EXPERIMENTAL 1.....	152
FASE EXPERIMENTAL 2.....	157
PROPUESTA DE PARÁMETROS NOVELES	159
CONCLUSIONES	164
LIMITACIONES	167
APLICACIONES PRÁCTICAS	169
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	171
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.....	75
Tabla 2.....	78
Tabla 3.....	108
Tabla 4.....	113
Tabla 5.....	119
Tabla 6.....	130
Tabla 7.....	131
Tabla 8.	132
Tabla 9.....	135
Tabla 10.....	136

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	31
Figura 2	34
Figura 3	40
Figura 4	45
Figura 5	49
Figura 6	56
Figura 7	86
Figura 8	88
Figura 9	90
Figura 10	91
Figura 11	95
Figura 12	97
Figura 13	98
Figura 14	110
Figura 15	111
Figura 16	120
Figura 17	137
Figura 18	138
Figura 19	139
Figura 20	140
Figura 21	141
Figura 22	142
Figura 23	143

Figura 24.	144
Figura 25.	145
Figura 26.	147
Figura 27.	148
Figura 28.	149

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

O₂: Oxígeno

CO₂: Dióxido de Carbono

SN: Sistema Nervioso

ANOVA: análisis de la varianza

SNC: Sistema Nervioso Central

SNS: Sistema Nervioso Simpático

SNP: Sistema Nervioso Parasimpático

SNA: Sistema Nervioso Autónomo

FC: frecuencia cardíaca

HR: anglicismo de FC

FC_{max}: frecuencia cardíaca máxima

Ach: acetilcolina

SA: sinuauricular

TA: tensión arterial

PA: presión arterial

IMC: índice de masa corporal

La: lactato en plasma sanguíneo

ECG: electrocardiograma

H⁺: ion de Hidrógeno

ANAM: actividad nerviosa autónoma muscular

VO_{2max}: consumo máximo de oxígeno

R-R: tiempo entre dos ondas R consecutivas

lpm: latidos por minuto

FSM: flujo sanguíneo muscular

VFC: variabilidad de la frecuencia cardíaca

HRR: anglicismo de VFC

RFC: recuperación de la frecuencia cardíaca

M: masculino

F: femenino

s: segundo

Hg: mercurio

mm: milímetro

cols: colaboradores

h: hora

Kg: kilogramo

HF: alta frecuencia (anglicismo)

LF: baja frecuencia (anglicismo)

ms²: milisegundos al cuadrado

HIIT: entrenamiento interválico de alta intensidad
(anglicismo)

VO_{2pico}: Consumo de oxígeno pico

Nº: número

T: tiempo

Cal: calorías

ABC: área bajo la curva

AUC: anglicismo ABC

SD: desviación estándar

EEUU: Estados Unidos de América

ICC: coeficiente de correlación intra-clase

SEM: error estándar de la medida

mMol: miliMol

W: watos

n: número de la muestra

AT: área total

INTRODUCCIÓN

GENERALIDADES DE LA FISIOLÓGÍA DEL EJERCICIO

El tejido muscular requerido para un ejercicio físico requiere un mayor aporte de nutrientes y O_2 , a la vez que incrementa la liberación de metabolitos y CO_2 al medio que le rodea: todos los sistemas fisiológicos se implican para mantener la correcta homeostasis celular durante este estado. El sistema cardiovascular, que regula el flujo de sangre a los tejidos, cumple un papel determinante durante el ejercicio, ya que el aumento de la frecuencia cardíaca (FC) tiene efecto directo sobre el flujo sanguíneo en el tejido muscular de forma que aumenta el aporte de nutrientes y O_2 y la retirada de metabolitos y CO_2 . Por tanto, la función central del sistema cardiovascular es fundamental durante el ejercicio.

La FC se acelera en función de la intensidad del ejercicio realizado, por lo que el aumento de la FC nos indica cuán intenso es un ejercicio hasta alcanzar la máxima activación del miocardio, la FC máxima (FC_{max}) que puede determinarse por medio de un test de ejercicio o establecerse mediante fórmulas teóricas. Por su parte, la FC_{max} se ha establecido tradicionalmente mediante la edad del sujeto, aunque la correlación de la FC_{max} teórica con la real no es muy alta (Borresen & Lambert, 2008; Tanaka, Monahan, & Seals, 2001).

Tras la realización de un ejercicio la FC sufre un descenso hasta niveles próximos a los basales, de manera que también se ve afectada por la adaptación del organismo al ejercicio. Normalmente, la recuperación de la FC (RFC) se relativiza al tiempo: cuanto más rápida se produzca menos estresante se entiende que ha sido el ejercicio, o mayor adaptación a ese tipo de estímulos existe. Este método de medición permite saber el nivel de adaptación general a una actividad física (Buchheit et ál., 2013).

La RFC se ha utilizado tradicionalmente en cardiópatas con el objetivo de analizar la capacidad cardíaca de recuperación tras una situación estresante. En este campo se han obtenido conclusiones muy positivas, ya que esta técnica permite incluso prever la mortalidad en este sector poblacional (Cole, Blackstone, Pashkow, Snader, & Lauer, 1999).

La intensidad real de un ejercicio no solo se puede basar en la FC, puesto que se debe establecer por la cantidad de ejercicio que se puede realizar y cómo de estresados se encuentran los sistemas fisiológicos implicados. Al respecto cabe señalar que aquellos datos que se refieren a la cantidad de ejercicio que se está realizando indicarán la carga externa (velocidad, peso, longitud, etc.), y aquellos que indican cómo de estresado está nuestro organismo señalarán la carga interna (FC,

actividad electromiográfica, consumo de oxígeno, etc.). Por lo tanto se ha de ser cauteloso a la hora de interpretar los datos relativos a la FC. Sin embargo, debido a la simplicidad de su determinación, la FC es un indicador de intensidad interna muy utilizado en diferentes deportes para controlar el desarrollo de entrenamientos y/o competiciones (Achten & Jeukendrup, 2003).

La práctica de actividad física de forma crónica tiene un efecto directo sobre la regulación de la FC. Como resultado de las adaptaciones de los sistemas fisiológicos al entrenamiento, aumenta la eficiencia metabólica (sistema muscular y respiratorio), lo cual provoca un efecto directo en el sistema nervioso (regulación de la actividad cardíaca) y consecuentemente en el sistema cardiovascular (Wilmore & Costill, 2004).

Para el propósito de este texto vamos a revisar los mecanismos fisiológicos implicados en la regulación de la FC durante y tras el ejercicio.

SISTEMA NERVIOSO

La realización de ejercicio requiere una movilización general de energía para atender a las demandas del tejido muscular activo, por lo que es indispensable una buena regulación nerviosa del control metabólico durante este. Además de las necesidades musculares existen otros factores relevantes en la práctica de la actividad física, como la regulación circulatoria, respiratoria y, en según qué actividades los sistemas sensores.

El Sistema Nervioso (SN) es el encargado de regular la información dentro del organismo. Mediante las redes neuronales que lo conforman se envían impulsos desde los puntos que reciben la información hasta aquellos que crean una respuesta, para más tarde devolver un impulso eléctrico para que se accione una respuesta a dicho estímulo. Así pues, el SN juega un papel fundamental en el ejercicio, ya que cuando un sujeto realiza una actividad física se reciben estímulos constantemente que han de ser respondidos con la mayor eficiencia posible: ya sea con una mayor rapidez, ya sea por un menor gasto metabólico. Estas adaptaciones, en muchos casos no son fáciles de medir y en según qué poblaciones resulta aún más

complejo hacerlo ya que el SN se puede encontrar afectado (Ricardo, 2005).

1. ESTRUCTURA Y FUNCIONES DEL SISTEMA NERVIOSO

Las distintas partes del SN se pueden dividir atendiendo a su disposición física o su función. Por su disposición se clasifica en SN Central (SNC, formado por encéfalo y médula espinal) y Periférico (formado por los nervios que se conectan directamente con otros órganos). Según su función se divide en SN Somático, que se compone de aquellas neuronas que realizan acciones conscientes, y SN Autónomo (SNA), que regula acciones no conscientes. Este a su vez, se divide en Simpático (SNS) y Parasimpático (SNP), que realizan acciones de activación y desactivación de los órganos respectivamente (Romagnoli, Alis, Sanchis-Gomar, Lippi, & Arduini, 2014).

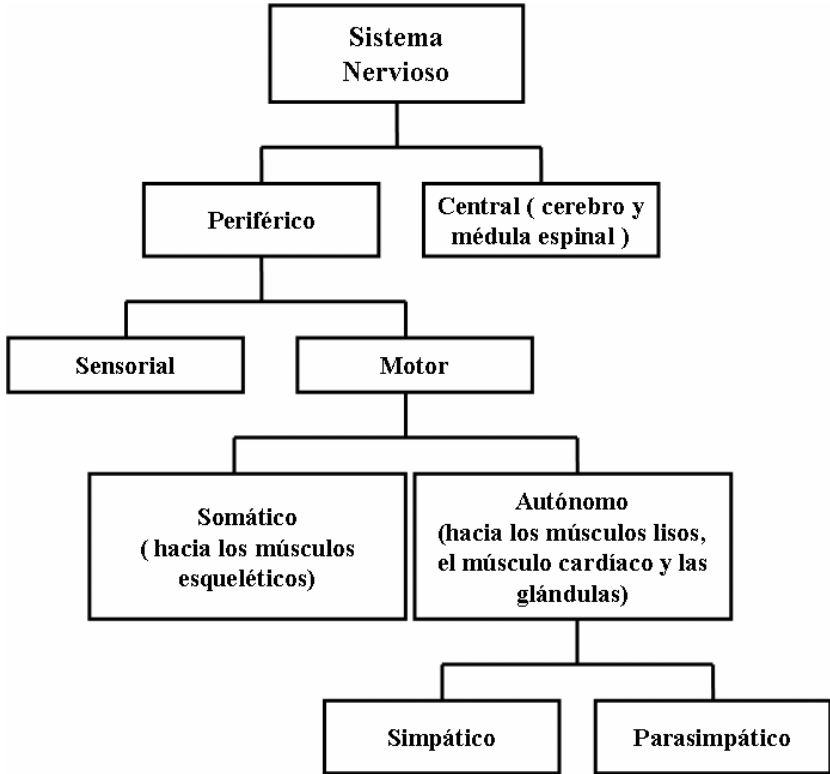


Figura 1. Clasificación funcional del Sistema Nervioso, adaptado de (Haines, 2013)

Tanto las respuestas agudas como las adaptaciones a largo plazo inducidas por el ejercicio están mediadas por la actividad de los sistemas de comunicación del organismo. La respuesta al ejercicio es nerviosa pero también humoral. En este sentido, el SNS y las glándulas adrenales juegan el papel principal en la respuesta individual de activación al condicionar,

directa o indirectamente, prácticamente todas las respuestas de órganos al ejercicio físico (Montero & Calderón, 2007).

1.1. Respuesta nerviosa autónoma

El SN Periférico contiene 43 parejas de nervios: 12 craneales y 31 espinales y puede dividirse en sistema sensor y motor. El sistema motor incluye también al SNA y lleva la información desde el SNC hasta los músculos. Por su parte, el sistema sensor lleva información constantemente desde nuestros sensores hasta el SNC, por lo que éste está informado constantemente de nuestro estado actual y del ambiente.

El SNA consta de centros nerviosos de la respuesta autónoma y componentes periféricos. Las estructuras neuronales centrales del SNA se encuentran integradas en las del SNC. El SNA es activado principalmente por centros localizados en la médula espinal, tronco encefálico e hipotálamo. Asimismo, porciones de la corteza cerebral y especialmente el sistema límbico, pueden transmitir impulsos hacia centros inferiores y ejercer influencia sobre el control autónomo. A menudo el SNA funciona también por actos reflejos, cuya respuesta nerviosa autónoma siempre se realiza de manera involuntaria.

La ejecución de una orden vegetativa se establece a través de dos grandes divisiones periféricas: el sistema periférico

simpático y el parasimpático. Funciones como la distribución del flujo sanguíneo, la motilidad, las secreciones o el transporte de fluidos están bajo su control (Montero & Calderón, 2007; Wilmore & Costill, 2004).

1.2. Respuesta nerviosa simpática

La respuesta nerviosa simpática se inicia en las neuronas espinales propias del sistema, que a su vez reciben información transmitida desde los centros superiores de la respuesta autónoma. Estas neuronas se encuentran distribuidas en la médula espinal, en sus segmentos T1-L3 (figura 2). La salida de la información se realiza por dos vías distintas: sistema de los ganglios paravertebrales y sistema de ganglios autónomos (la médula adrenal puede considerarse como un ganglio simpático autónomo, aunque sus fibras pos-ganglionares vacían sus neurotransmisores a la sangre)(Riera, 2015).

Sistema nervioso autónomo

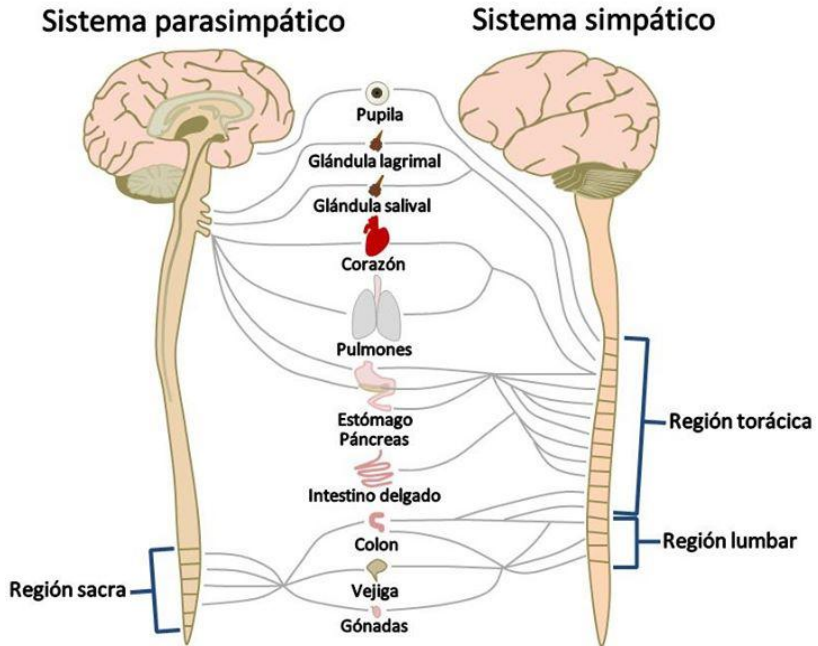


Figura 2. Disposición de los nervios del SNA en la columna vertebral; modificado de (Pereyra, 2014)

En los ganglios autónomos, tanto simpáticos como parasimpáticos, la estimulación de los axones presinápticos induce la liberación de acetilcolina (colinérgicas). En la mayoría de las fibras pos-ganglionares simpáticas son la adrenalina y noradrenalina los neurotransmisores (neuronas adrenérgicas). Asimismo, están las llamadas neuronas purinérgicas, que son identificadas como no adrenérgicas, no colinérgicas, que liberan ATP en el receptor provocando la relajación del tejido muscular

liso; cabe destacar que la mayoría de las neuronas posganglionares son de este tipo (Schünke, 2006).

1.3. Respuesta nerviosa parasimpática

Las neuronas iniciales parasimpáticas se encuentran en el tronco cerebral (núcleos de pares craneales III, VII, IX y X) y en la porción distal (S2 a S5) de la médula espinal (figura 2).

A diferencia del simpático, únicamente existen fibras preganglionares largas. Los ganglios periféricos no se encuentran anatómicamente constituidos como tales, sino que se disponen como cúmulos neuronales situados en la vecindad o en el propio órgano que inervan. Por ello las fibras posganglionares son siempre cortas. Las eferencias parasimpáticas llegan a los órganos desde la cabeza incorporadas en los pares craneales, mientras que las destinadas al tronco y al abdomen lo hacen a través del vago (a la actividad parasimpática también se la denomina actividad vagal). Dichas eferencias de la médula sacra son incorporadas al nervio pélvico, inervando a los órganos abdominales inferiores y a los sexuales y genitales externos. Todas las fibras preganglionares y posganglionares parasimpáticas liberan acetilcolina como neurotransmisor (Schünke, 2006).

2. RESPUESTA AUTÓNOMA AL EJERCICIO

El SNA es nuestro sistema de “lucha o huida”: prepara al organismo para una situación de crisis; es decir, cuando estamos excitados nuestro SNA produce una descarga masiva en todo el cuerpo que nos prepara para una acción.

Los efectos de la estimulación simpática son importantes para el deportista, como el aumento de FC y la fuerza de contracción cardíaca o, la dilatación de los vasos coronarios, pues incrementan la aportación de sangre al músculo cardíaco y producen un mayor riego sanguíneo a los músculos esqueléticos activos por la vasodilatación. Además la vasoconstricción en la mayoría de los otros sistemas facilita el riego muscular y la tensión arterial aumenta, lo que mejora la perfusión sanguínea y el retorno venoso. La broncodilatación mejora el intercambio de gases y el ritmo metabólico se incrementa, lo que refleja un mayor esfuerzo del organismo por satisfacer las necesidades energéticas. Así mismo la actividad mental se aumenta, lo que resulta en una mejor percepción de los estímulos sensores, más tarde, la glucosa es liberada al corriente sanguíneo y las funciones de menor necesidad se retardan: renal, digestiva, etc.

Estas alteraciones básicas en la función corporal facilitan nuestra respuesta motora y dan cuenta de la importancia del

SNA para prepararnos para una tensión aguda o para la actividad física (Chicharro & Vaquero, 2006; Riera, 2015).

2.1. Respuestas cardio-respiratorias

Desde el cerebro (en gran medida en la zona hipotalámica), se produce una respuesta general frente a una situación de estrés, que se traduce en una segregación de noradrenalina sintetizada en el cerebro. Al mismo tiempo, se activa el SNS desde las zonas superiores autónomas hacia la médula espinal, la cual distribuye dicho proceso por los nervios aferentes adrenérgicos. Además, al activarse las glándulas suprarrenales estas segregan catecolaminas al corriente sanguíneo pudiendo llegar a concentraciones mayores a 50 veces la basal (Chicharro & Vaquero, 2006).

La biosíntesis de las catecolaminas se produce en tres órganos distintos: el cerebro (hipotálamo), las glándulas suprarrenales y los nervios adrenérgicos. La tirosina es captada desde el corriente sanguíneo por las células y es metabolizada por distintos procesos hasta resultar en dopamina, la cual es almacenada en los gránulos citoplasmáticos y es utilizada como neurotransmisor en las células nerviosas, tanto hipotalámicas como adrenérgicas. Por el contrario, no ocurre así en las células

suprarrenales, en las cuales puede transformarse en adrenalina mediante un proceso de metilación (Schwartz, 1998).

Cuando son secretadas y aún no están metabolizadas, las catecolaminas pueden seguir tres vías: o bien una pequeña fracción es eliminada por la orina, o una cierta cantidad es metabolizada en ciertos órganos o, por último, la mayor parte es captada por las terminaciones nerviosas del SNS por transporte activo y contra gradiente de concentración. La desaparición de las catecolaminas secretadas en plasma suele ser muy corta (vida media=30 segundos) (Chicharro & Vaquero, 2006).

Por otra parte, la acetilcolina (Ach) se sintetiza en las mitocondrias nerviosas a partir de la esterificación de colina que llega por el corriente sanguíneo desde las reservas grasas del hígado. La reserva de la Ach se realiza en el citoplasma presináptico por medio de vesículas. Una vez se libera al espacio intersináptico y se produce la despolarización de la neurona postsináptica, la Ach desaparece por difusión o destrucción enzimática por colinesterasas (Cormack, Newton, & McGuigan, 2008; Chicharro & Vaquero, 2006; Schwartz, 1998).

Los receptores de la señal eferente por el SNS son de dos tipos: α y β , que se encuentran divididos a su vez en dos grupos:

α_1 , α_2 , y β_1 , β_2 . Dependiendo de la concentración de según qué tipos de receptores, la respuesta será una u otra.

Así pues, y teniendo tan solo en cuenta las reacciones cardio-respiratorias, las α_1 provocan la contracción del músculo liso vascular y el aumento de la fuerza de contracción y excitabilidad del corazón; por lo que respecta a las α_2 , producen una contracción del músculo liso vascular y la disminución de contractibilidad de los ventrículos; por su parte, las β_1 generan el aumento de la FC y la fuerza de contracción y una mayor conducción del nodo aurículo-ventricular; y por último, las β_2 aumentan la actividad respiratoria inervando sobre bronquios y alveolos (Blain, Meste, & Bermon, 2005). Estos receptores destacan por su implicación en el ejercicio en campos tan relevantes como el dopaje, ya que la mayoría de sustancias utilizadas para ayudas ergonómicas tienen efectos sobre los α (efedrina, terbutelina, fenilefrina, etc.) y β (butanol, formoterol, clenbuterol, etc.) (Py et ál., 2015).

Los nervios colinérgicos también son de dos tipos: nicotínicos y muscarínicos. Los receptores de la actividad eferente de estos nervios son de tipo M1-M5. Aquellos que se hallan principalmente en los órganos cardio-respiratorios son los M2, que provocan la ralentización de la despolarización espontánea en el nodo sinauricular (SA), la disminución de la

velocidad de conducción del nodo aurículo-ventricular (AV) y el descenso del periodo refractario y la fuerza contráctil auricular (figura 3)(Brink, Visscher, Coutts, & Lemmink, 2012; Brink, Visscher, Schmikli, Nederhof, & Lemmink, 2013; Correia, Noya-Rabelo, & Barreto-Filho, 2014).

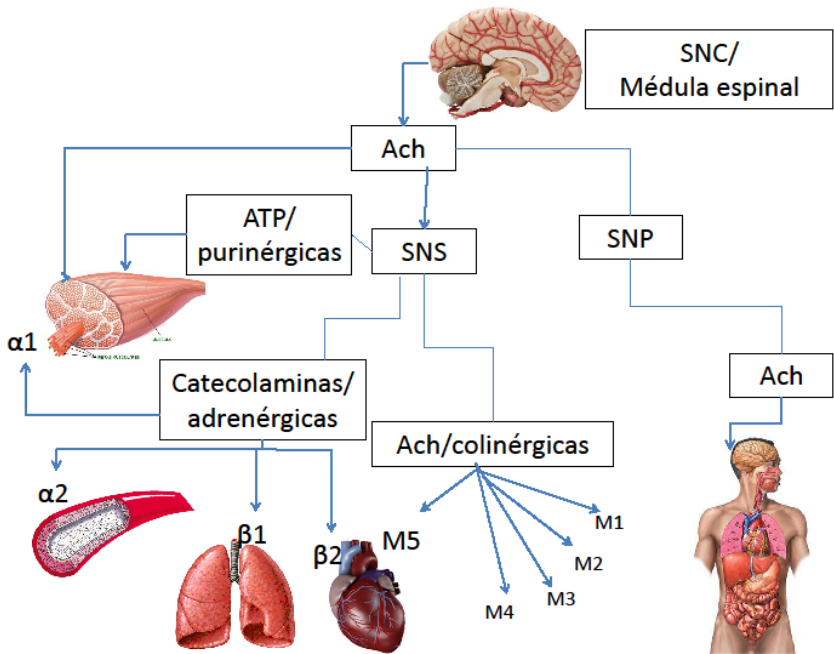


Figura 3. Descripción gráfica de los neurotransmisores, sistemas nerviosos y receptores nerviosos descritos en este apartado.

2.2. Condicionantes de la respuesta autónoma al ejercicio

La valoración de las respuestas y adaptaciones del sistema neuroendocrino debe tener en cuenta otros factores fisiológicos que no están relacionados directamente, como la intensidad del ejercicio (Mann, Webster, Lamberts, & Lambert, 2014), su duración (Meeusen et ál., 2013), los efectos del entrenamiento (Daanen, Lamberts, Kallen, Jin, & Van Meeteren, 2012), el estrés psicológico (Morales et ál., 2013), la presión atmosférica, la temperatura (Rowell, Coutts, Reaburn, & Hill-Haas, 2009), la dieta (Buchheit & Mendez-Villanueva, 2010), la disposición de hidratos de carbono (glucosa), la posición del cuerpo (Leicht & Allen, 2008), la hipertrofia (masa muscular ejercitante) y la disponibilidad de O₂ (Chicharro & Vaquero, 2006; Montero & Calderón, 2007; Wilmore & Costill, 2004).

SISTEMA CIRCULATORIO

El sistema circulatorio se compone de corazón, vasos sanguíneos (venas y arterias) y sangre. El corazón facilita a través de la contracción de sus cavidades, que la sangre se distribuya por dos circuitos (mayor y menor) de vasos sanguíneos distintos: uno para recoger sangre oxigenada y devolverla al corazón, y el otro para distribuirla por el resto del organismo y vuelva con sangre desoxigenada (Casey & Joyner, 2011).

1. LOS VASOS SANGUÍNEOS

Los vasos sanguíneos son los túbulos por los que se segrega la sangre por el cuerpo y se pueden diferenciar por su estructura y función. Las arterias se forman por la túnica adventicia (la capa más externa) de tejido conjuntivo laxo; la túnica media, formada por músculo liso y fibras elásticas, y la túnica interna, de tejido epitelial que contacta con la sangre. Con una composición similar, las venas evitan que la sangre retorne, con ayuda de las válvulas venosas, ya que son más rígidas debido a que en su parte media tienen menor elasticidad y en la adventicia son más gruesas. Por último, los capilares son el nexo de unión entre las arterias y las venas que están constituidos por

endotelio para facilitar el intercambio con otros tejidos y se forman a partir de las ramificaciones arteriales (arteriolas) y venosas (vénulas).

La presión arterial se utiliza como un marcador del estado del sistema circulatorio, aunque puede tener algunas controversias. Las arterias pueden soportar desde unos 70 hasta unos 170 mm de Hg en estado normal (Wilmore & Costill, 2004).

2. CORAZÓN

El corazón se compone de cuatro cavidades, dos aurículas y dos ventrículos. Las aurículas reciben la sangre desde las venas cava y aorta y, tras su llenado, realizan una contracción para así facilitar el paso de la sangre a los ventrículos. La aurícula derecha se comunica con el ventrículo derecho a través de la válvula tricúspide, mientras que la aurícula izquierda y el ventrículo izquierdo lo hacen mediante la válvula bicúspide o mitral. A la aurícula derecha llegan las venas (dirigen la sangre al corazón) cavas y a la izquierda, las pulmonares. Del ventrículo derecho parte la arteria (dirige la sangre a los órganos) pulmonar, y desde el izquierdo, la aorta. La salida de la sangre desde los ventrículos la permiten las válvulas sigmoideas o semilunares.

El corazón está formado por tres tejidos distintos. En primer lugar se encuentra el pericardio, que es el tejido seroso que lo envuelve dándole una protección y uniéndolo a los órganos adyacentes. A continuación está el endocardio, que es el tejido epitelial que facilita la unión entre el corazón y los vasos sanguíneos. Por último, el miocardio es el tejido muscular cardíaco que facilita la contracción de sus cuatro cavidades.

Las cavidades del corazón realizan dos acciones: la contracción (sístole) y la distensión (diástole). Siempre y cuando no existan ciertas patologías, cuando las aurículas se encuentran en fase de sístole, los ventrículos están en diástole, y viceversa. No obstante, existe un momento de relajación general en el que las cuatro cavidades se encuentran en diástole para la captación de sangre por parte de las aurículas. Las diferentes fases de sístole/diástole forman un ciclo cardíaco, que normalmente se da del mismo modo.

La regulación de la actividad cardíaca se da de una manera más autónoma que en la mayoría de los órganos, debido a que existe una red de tejido nodal que facilita la estimulación eléctrica según su disposición en el corazón. Todo ello se produce por las particularidades estructurales y funcionales del músculo cardíaco.

Los elementos que forman la red muscular especializada (nodal) caracterizan el ciclo cardíaco del siguiente modo (figura 4): la primera electronegatividad nace en el nódulo de Kreith y Flack (o sinoauricular –SA-), pero su modalidad de propagación hasta el nódulo de Tawara (o auriculoventricular –AV-) es motivo de controversia. Del último surge el fascículo de Bachman destinado a la aurícula izquierda. A velocidad de conducción a esos niveles sería del orden de 1m/s e incluso de 3 m/s en el fascículo de Bachman.

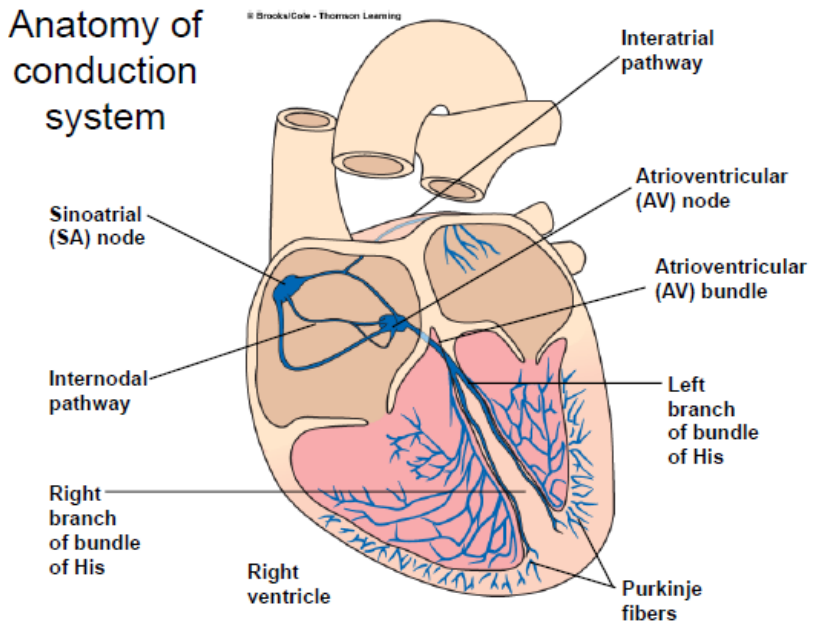


Figura 4. Red nodal y estructura cardíaca, adaptado de (Sherwood, 2015).

Sea como fuere, la despolarización de la aurícula derecha precede en 0,03 a 0,04 s a la despolarización de la aurícula izquierda, con una duración, cada una de ellas, de aproximadamente 0,05 a 0,06 s (en estado de reposo). La duración total del fenómeno es de 0,08 a 0,10 s. El tiempo dado entre las diferentes fases es de gran importancia, ya que cada una de ellas corresponde a una onda del electrocardiograma (ECG), y dotarán a la señal de un tipo de información u otra a la hora de valorar la actividad cardíaca (Davis, 2007; Schneider, Barthel, & Watanabe, 2004; Sherwood, 2015).

3. FRECUENCIA CARDÍACA

La frecuencia cardíaca se mide tomándole el pulso a un sujeto y es uno de los parámetros cardiovasculares más sencillos y con más información relativa al estado de este. Además, refleja la intensidad del esfuerzo que debe hacer el corazón para satisfacer las demandas energéticas del cuerpo cuando está inmerso en una actividad. Para comprender esto, debemos diferenciar entre frecuencia cardíaca en reposo y durante el ejercicio (Wilmore & Costill, 2004).

3.1. Frecuencia cardíaca en reposo

En reposo, el promedio es de 60 a 80 latidos por minuto (lpm). En los individuos desentrenados, sedentarios y de mediana edad, el ritmo puede superar los 100 latidos por minutos. En deportistas que siguen entrenamientos de resistencia muy específicos, se han descrito frecuencias que en reposo oscilan entre 28 y 40 latidos por minuto. La frecuencia cardíaca, normalmente, decrece con la edad y se ve afectada también por factores ambientales: por ejemplo, aumenta con la temperatura y la altitud (Wilmore & Costill, 2004).

Antes del inicio del ejercicio, la frecuencia cardíaca suele aumentar por encima de los valores normales de reposo, es lo se denomina *respuesta anticipatoria* debido a los impulsos nerviosos corticales. Por ello las estimaciones fiables de la verdadera frecuencia cardíaca en reposo deben hacerse bajo condiciones de total relajación, como a primeras horas de la mañana, después de un sueño reparador, etc. (Achten & Jeukendrup, 2003).

3.2. Frecuencia cardíaca durante el ejercicio

Cuando se empieza a hacer ejercicio, la frecuencia cardíaca aumenta en proporción directa al incremento de la intensidad, y si este es constante, se llega a un punto cercano al

agotamiento. Al aproximarse a ese punto, la frecuencia cardíaca empieza a nivelarse, lo que muestra que nos acercamos al valor máximo. La frecuencia cardíaca máxima (FC_{max}) es el valor máximo de la frecuencia cardíaca que se alcanza al llegar al agotamiento. Es un factor muy fiable que se mantiene de un día para otro y solo cambia ligeramente de año en año (Buchheit, 2013).

Durante el ejercicio dinámico, la frecuencia cardíaca aumenta de forma proporcional a la intensidad del ejercicio hasta llegar a la máxima intensidad (prueba de esfuerzo máxima, figura 5). Este comportamiento peculiar de la frecuencia cardíaca durante las intensidades más altas del ejercicio permitió que Conconi y cols publicaran, en 1982, un método no invasivo para la determinar el umbral anaeróbico mediante el estudio del punto de deflexión de la frecuencia cardíaca durante un test de campo incremental (Camm et ál., 1996; Ferrari Conconi, Ferrari, Ziglio, Droghetti, & Codeca, 1982; Kenney, Wilmore, & Costill, 1999; Plews, Laursen, Kilding, & Buchheit, 2013).

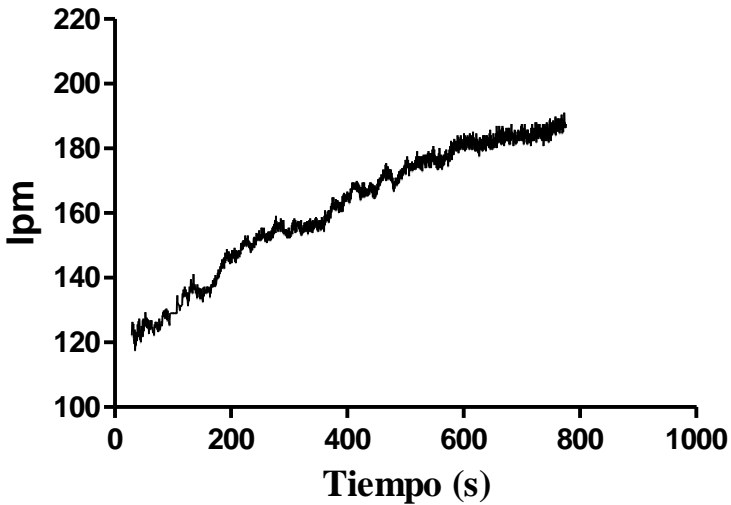


Figura 5. Prueba de esfuerzo. Resultados de FC en una prueba de esfuerzo incremental máxima

La actividad vegetativa (simpática y parasimpática) ejerce la regulación más importante sobre la frecuencia cardíaca. El ejercicio dinámico desencadena un aumento de la actividad simpática, así como una inhibición del sistema parasimpático. El efecto que estas dos funciones ejercen sobre la frecuencia cardíaca podemos comprobarlo fácilmente en los sujetos que están tomando beta bloqueantes o en los sujetos con el corazón denervado, como es el caso de los receptores de trasplante cardíaco (Chicharro & Vaquero, 2006).

3.3. Estabilidad de la frecuencia cardíaca

Cuando el ritmo de esfuerzo se mantiene constante a niveles submáximos de ejercicio, la FC incrementa muy rápidamente hasta llegar a estabilizarse. Este punto de estabilización se conoce como “*estado estable de la frecuencia cardíaca*”, y es el ritmo óptimo del corazón para satisfacer las exigencias circulatorias a esa intensidad específica de esfuerzo. Para cada incremento posterior a esta, la frecuencia cardíaca alcanzará un nuevo valor estable al cabo de 2 o 3 minutos. No obstante, cuanto más intenso es el ejercicio, más se tarda en alcanzar dicha estabilidad (Wilmore & Costill, 2004).

El concepto de FC estable constituye la base de varias pruebas que se han desarrollado para estimar el nivel de estado físico. En una de estas pruebas, a los sujetos se los sitúa en un dispositivo para hacer ejercicio, como, por ejemplo, en un cicloergómetro, y se les hace ejercitarse a dos o tres ritmos de esfuerzo distintos. Los que están en mejores condiciones físicas, basándose en su resistencia cardio-respiratoria, tendrán estados estables más bajos de la frecuencia cardíaca a un ritmo determinado de esfuerzo que quienes no están en tan buena forma. Por lo tanto, la frecuencia cardíaca estable es un pronosticador fiable de la eficacia del corazón: una frecuencia

cardíaca menor refleja un corazón más eficaz (Chicharro & Vaquero, 2006; Wilmore & Costill, 2004).

Cuando el ejercicio se realiza a un ritmo constante durante un tiempo prolongado, particularmente bajo condiciones de calor, la frecuencia cardíaca tiende a aumentar en lugar de mantener su valor estable. Esta respuesta es parte de un fenómeno llamado desplazamiento cardiovascular (Chicharro & Vaquero, 2006).

3.4. Condicionantes de la frecuencia cardíaca

La magnitud de la respuesta cardíaca depende fundamentalmente del número y tamaño de los grupos musculares implicados en el ejercicio. Para conocer la frecuencia cardíaca máxima real de un sujeto, es necesario someterlo a un tipo de ejercicio en el que participe el mayor número de grupos musculares posible. No obstante, algunos factores condicionan la respuesta de la FC al ejercicio (Achten & Jeukendrup, 2003).

Dependiendo del tipo de grupos musculares que participan en el ejercicio, la respuesta de la FC puede ser distinta. Un ejercicio con los miembros superiores a una intensidad determinada desencadena una respuesta de la frecuencia cardíaca mayor que si se realiza con los miembros inferiores. Una posible explicación a esto es un mayor reclutamiento de

unidades motoras de tipo II (menos eficientes desde el punto de vista fisiológico) durante el trabajo con brazos que durante el trabajo con piernas. Además, se acompaña de una cinética más lenta del consumo de oxígeno (Schneider et ál., 2004). Por otra parte, para el mismo valor relativo de VO_{2max} , determinados tipos de ejercicios provocan mayor respuesta de la frecuencia cardíaca que otros. Esto tiene implicaciones prácticas a la hora de utilizar la frecuencia cardíaca como indicador de la intensidad del ejercicio y control del entrenamiento. Debido al cada vez más extendido uso de los pulsómetros para entrenar, es importante realizar pruebas de esfuerzo, para determinar el umbral anaeróbico y la frecuencia cardíaca correspondiente, que permitirá controlar el entrenamiento (Camm et ál., 1996; Chicharro & Vaquero, 2006).

Si realizamos una comparación por sexos, hay un aumento mayor de la frecuencia cardíaca, con una carga absoluta igual, en mujeres que en hombres (Carnethon, 2005).

También existe una tendencia a ir disminuyendo la frecuencia cardíaca correspondiente a la carga con la edad. En el caso de la frecuencia cardíaca máxima, parece que el único factor que la condiciona es la edad, reduciéndose. Las fórmulas para calcular la frecuencia cardíaca máxima de un sujeto introducen como única variable la edad, sin tener en cuenta otros factores.

Si bien existe una fórmula más sencilla y más utilizada para calcular la frecuencia cardíaca máxima teórica de un sujeto ($FC_{\max} = 220 - \text{edad}$), un estudio ha demostrado que esta fórmula subestima la frecuencia cardíaca máxima real y propone la utilización de la siguiente ecuación para una población general: $FC_{\max} = 208 - 0,7 \times \text{edad}(\text{años})$ (Tanaka et ál., 2001).

Uno de los principales efectos del entrenamiento de resistencia es la modificación de la respuesta de la frecuencia cardíaca al ejercicio. Los sujetos entrenados presentan frecuencias cardíacas sub-máximas inferiores que los no entrenados para una misma carga de trabajo, sin que se detecten modificaciones de la frecuencia cardíaca máxima (Daanen, 2012).

Tanto las temperaturas elevadas como el aumento de la humedad relativa provocan una mayor respuesta de la frecuencia cardíaca, de manera que para una misma carga de trabajo en estas condiciones, la frecuencia cardíaca es más elevada. Con respecto a la presión atmosférica (que viene determinada por la altura), acompañada de una hipoxia, provoca un aumento de la frecuencia cardíaca que se experimenta incluso en reposo y a intensidades sub-máximas de ejercicio (Kenney et ál., 1999).

Al igual que ocurre en reposo, se pueden encontrar variaciones en el comportamiento de la frecuencia cardíaca durante el ejercicio a lo largo del día (y la noche), por lo que siempre resulta interesante realizar el seguimiento de los parámetros fisiológicos a la misma hora. Este efecto es conocido como *cambios circadianos* (Chicharro, 2006).

Son muchas las enfermedades que pueden afectar a la respuesta de la frecuencia cardíaca al ejercicio, principalmente aquellas en las que se reduce la capacidad funcional del sujeto (o la tolerancia al ejercicio). En la mayoría de ellas (anemias, cardiopatías, enfermedades respiratorias, etc.) la frecuencia cardíaca del esfuerzo es más elevada que en los sujetos sanos (Åstrand, Rodahl, Dahl, & Strømme, 2010; Kenney et ál., 1999; Wilmore & Costill, 2004).

4. RESPUESTA CARDIOVASCULAR PERIFÉRICA AL EJERCICIO

El sistema cardiovascular se ocupa de la distribución de la sangre por el organismo a través de sus vasos, determinando su flujo a partir de la vasoconstricción o vasodilatación y adecuando el flujo sanguíneo en cada órgano para mantener la homeostasia. En el momento en que un tejido precisa de mayor cantidad de nutrientes, las arterias de esta zona se dilatan para

facilitar la llegada de sangre. El mecanismo encargado de la regulación de estos cambios vasculares se llama *control reflejo circulatorio* (Gouloupoulou, 2009).

En el *control reflejo circulatorio* existen dos tipos de reflejos, químicos y mecánicos, dependiendo del modo de hallar los desajustes (existe el mismo número de fracciones nerviosas aferentes en cada uno de ellos). Los quimio-receptores se encuentran en el interior de los músculos y perciben los excesos de metabolitos: lactato (Lac⁻), pH e iones de hidrógeno (H⁺), además de otros. Los mecano-receptores captan los cambios en la presión vascular y el gasto cardíaco entre otros (Beneke, Leithauser, & Ochentel, 2011; Coyle et ál., 1983).

En el momento en el que se da un posible error o conflicto entre quimio/mecano-receptores, se activan otros reflejos para la compensación y corrección de estas diferencias (figura 6). El principal de estos reflejos es el isquémico presor muscular, que regula el desorden entre el flujo sanguíneo y los metabolitos captados por los quimio-receptores activando el SNS, aumentando la presión arterial (PA) y, por lo tanto, el flujo sanguíneo, reduciendo así la concentración de metabolitos. Al finalizar el ejercicio, la PA se mantiene hasta que haya una concentración normal de metabolitos. Este reflejo se determina

por la eficiencia respiratoria y la isquemia (Rowell & O'Leary, 1990).

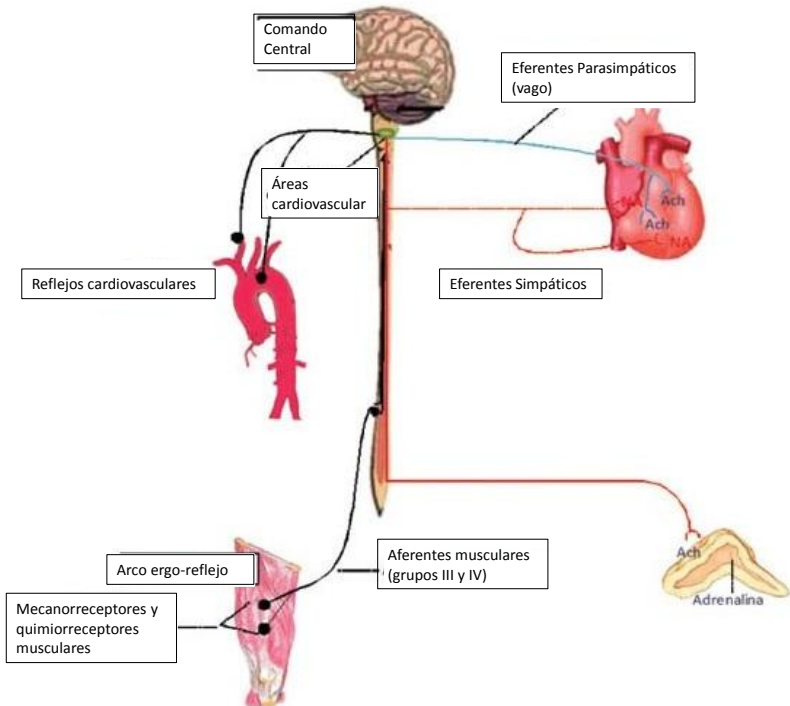


Figura 6. Reajuste cardiovascular mediante los arcos reflejos de este sistema (adaptado de Correia 2014)

Existen cuatro grupos de nervios aferentes. Los correspondientes a los arcos reflejos de quimio/mecanorreceptores son los grupos IV y III respectivamente que se activan/desactivan por ergo-receptores (a partir de sustancias nocivas/no nocivas) y captan situaciones mecánicas extremas

y/o algemia. El grupo III es más lento en sus reacciones que el IV, pero la isquemia aumenta la activación de los dos grupos. Los grupos I y II son mayormente Órganos de Golgi y husillos, los cuales no desencadenan acciones cardiovasculares.

La activación de los grupos III y IV aumenta la PA. La acción de estos en la FC es relativamente pequeña, ya que la resistencia vascular y la FC se controlan de forma diferente durante el ejercicio (Joyner, 2014; Rowell & O'Leary, 1990).

La actividad simpática medida directamente (ANAM) se correlaciona con la fuerza ejecutada y la PA, sin embargo no ocurre así con la FC, ya que está controlada por comandos centrales y, por consiguiente, tiene variaciones más a menudo. En cambio, la PA está controlada por comandos centrales y arcos quimio-reflejos (Gouloupoulou, 2009).

La activación del SNA se da por un aumento de $[H^+]$ intramuscular. También se correlaciona positivamente la glicólisis muscular y la producción de lactato $[Lac^-]$ con la activación refleja del SNA en ciertos tipos de ejercicio. El aumento de PA en ejercicio ocurre por la activación del SNA por acción de arcos quimio-reflejos (Rowell & O'Leary, 1990).

Otro arco reflejo de gran importancia en la respuesta vascular al ejercicio es el arco baro-reflejo arterial. Los

receptores sensibles a la PA modifican mecanismos adyacentes para estabilizarla. Durante un ejercicio moderado-vigoroso, el arco baro-reflejo no se activa pero la PA se mantiene estable. A pequeños cambios en R-R, se producen alteraciones en PA. Dependiendo del momento de medición, los cambios en la FC, R-R y PA se relacionan o no, debido a que la respuesta parasimpática es más lenta en unos órganos que en otros. Por lo tanto, R-R no es un índice válido para la medición del reflejo enteramente. Los mecano-receptores arteriales no se adaptan por sí solos a un aumento de la FC causado por ejercicio, pero sí se adaptan rápidamente a un aumento de PA. Este rápido reajuste baro-reflejo no se da cuando los receptores se exponen a una elevada presión pulsátil. Una razón para el aumento de PA es que el baro-reflejo demanda dicha subida (Joyner, 2014).

Después de que los comandos centrales reajusten el arco baro-reflejo y aumente el gasto cardíaco por desactivación vagal, el principal error corregido por el SNS es entre conductancia vascular y gasto cardíaco: PA. La corrección metabólica se da a intensidades más altas, por lo que es secundaria.

Si el arco baro-reflejo es reajustado inmediatamente a la intensidad de ejercicio, el control cardiovascular puede explicarse por continuos ajustes de pequeños cambios en la PA causados por disparidades entre gasto cardíaco y conductancia

vascular (Joyner, 2014; Rowell & O'Leary, 1990). Si el ejercicio es medio, el arco baro-reflejo puede aumentar la PA por gasto cardíaco o vasoconstricción de zonas inactivas. Como gasto cardíaco y conductancia vascular aumentan con la intensidad de ejercicio, la vasoconstricción de zonas inactivas y el aumento de gasto cardíaco contribuyen cada vez menos al aumento de la PA. Cuando la intensidad es casi máxima (por gasto cardíaco) y se acerca a un 85% del total de conductancia vascular en músculos activos, la PA puede aumentar solo por vasoconstricción en músculos activos (Rowell & O'Leary, 1990).

Los arcos quimio y baro-reflejo se activan en diversos momentos del ejercicio debido a la doble/triple diferencia en mamíferos en la capacidad de bombeo cardíaco/peso corporal (kg). La activación baro-refleja y el aumento de la actividad del SNA se darán siempre que el gasto cardíaco aumente hasta activar PA al siguiente nivel operativo. Esto no ocurre en ejercicio leve, ya que la FC y el gasto cardíaco aumentan la PA hasta el nivel operativo óptimo. Como consecuencia, el SNA no se activa, por lo que no hay ninguna vasoconstricción significativa. La importancia del arco baro-reflejo está en que después de la denervación baro-refleja la PA disminuye al inicio del ejercicio medio, se mantiene deprimido, y es inestable, por influencias ajenas a la PA la mantienen no tamponada. Así, con el arco quimio-reflejo desactivado debido a la baja intensidad, se

necesita de él para mantener la PA estable, a partir de la activación del SNA (Joyner, 2014; Rowell & O'Leary, 1990).

5. TÉCNICAS DE MEDIDA DE LA ACTIVIDAD SIMPÁTICO-VAGAL

Durante la activación/desactivación simpático-vagal se dan diversos procesos encadenados que se producen en diferentes órganos. Según aquello que queramos determinar, los métodos de medición serán más o menos indirectos. Normalmente, cuanto más indirecta es una técnica de medición menos invasiva es. Así pues, para hallar la concentración de catecolaminas en el corriente sanguíneo se ha de realizar una punción. En cambio, para hallar la RFC y/o la Variabilidad de la FC (VFC) solo se ha de medir el pulso (R-R) (Kaikkonen, Hynynen, Mann, Rusko, & Nummela, 2012).

5.1. Concentración de catecolaminas en plasma

La respuesta simpático-adrenal al ejercicio se ha estudiado principal y tradicionalmente mediante la concentración de catecolaminas en plasma sanguíneo, cuya extracción se suele realizar por punción arterial. Además, en los individuos sanos y en reposo, la adrenalina arterial es un 30-50% mayor que en vena por su difusión en el antebrazo. Los

pulmones contribuyen con la mayor liberación de noradrenalina a sangre venosa (33%), los riñones (22%) y el músculo esquelético (20%). Por lo tanto, la medición de catecolaminas en plasma arterial no refleja la actividad simpático-adrenal real (Chicharro & Vaquero, 2006).

En pruebas de esfuerzo incrementales en cicloergómetro se produce un aumento de concentración exponencial de la concentración de catecolaminas en plasma a partir de una intensidad del 75% VO_{2max} . En otro tipo de protocolos estudiados, los autores determinan que este aumento tiene lugar a intensidades desde el 60% VO_{2max} . Estas diferencias se dan, además de por el protocolo, por la muestra (sujetos muy entrenados en diferentes disciplinas, por lo que las adaptaciones son proporcionales). La activación simpática que explica este fenómeno tiene lugar principalmente en el lecho vascular (vasoconstricción), el corazón (cardio-aceleración), hígado y riñones (disminución del flujo) así como en el espacio intersináptico (bloqueo de recaptación adrenérgica).

Aquello en lo que muchos autores coinciden, es que los cambios de concentración de catecolaminas en plasma están más relacionados con la carga relativa de ejercicio y no tanto con la absoluta. La acumulación de Lactato a altas intensidades de ejercicio es una evidencia indirecta del incremento de

catecolaminas en plasma (Urhausen, Gabriel, & Kindermann, 1995). También se ha demostrado la relación entre otras variables hemológicas, como el volumen plasmático, con la regulación simpático-vagal (Buchheit, Laursen, Al Haddad, & Ahmaidi, 2009; Buchheit, Al Haddad, Mendez-Villanueva, Quod, & Bourdon, 2011).

5.2. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca

La VFC es una medida no invasiva obtenida por los intervalos R-R que ha sido reconocida como un medio para la evaluación del control autónomo de la FC. Sus índices pueden estar representados en dominio de tiempo, en los cuales se simbolizan los intervalos R-R (milisegundos) frente al tiempo.

La VFC también puede estar representada en dominio de frecuencia, la cual representa la frecuencia con la que se repiten diversos intervalos R-R en un segmento en concreto. Así mismo, esta se explica como la densidad de la potencia espectral y corresponde a la potencia de las diferentes oscilaciones representadas en un tacograma de R-R. En este dominio, los picos de distintas frecuencias representan diversas contribuciones de los sistemas Simpático y Parasimpático. La actividad parasimpática contribuye sustancialmente a la potencia de alta frecuencia (HF) (ms^2) y junto con la actividad

simpática contribuyen, ambas, a la potencia de baja frecuencia (LF). El ratio LF:HF representa el balance simpático-vagal, que permite que la VFC pueda ser utilizada como un índice de la respuesta autónoma, ya que valores altos representan un predominio simpático (Gouloupoulou, Fernhall, & Kanaley, 2009).

Existe una gran cantidad de estudios que se interesan por la valoración pos-esfuerzo en diversas poblaciones (deportistas *amateurs* y de élite, sedentarios, enfermos, etc.) y con distintos tipos de ejercicios (aeróbicos, de transición aeróbica-anaeróbica, HIIT, etc.); esto hace más costoso que haya un consenso entre la comunidad científica sobre los métodos que cabe utilizar y las conclusiones. No obstante, está más que demostrado su valor como herramienta de medición de la actividad simpático-vagal en fases de reposo y desestabilización (recuperación). El hecho de que investigadores de distintas disciplinas relacionadas con el ejercicio la utilicen, hace que este método de valoración sea cada vez más relevante (Buchheit, Simon, Piquard, Ehrhart, & Brandenberger, 2004; Buchheit, Mendez-Villanueva, Quod, Poulos, & Bourdon, 2010; Buchheit & Laursen, 2013; Camm et ál., 1996; Niewiadomski, Gąsiorowska, Krauss, Mroz, & Cybulski, 2007).

5.3. Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

La RFC es un parámetro fisiológico que hace referencia al descenso de Frecuencia cardíaca (FC) posejercicio. La recuperación de un ejercicio dinámico implica la reactivación parasimpática y la desactivación simpática, causando un descenso de la FC (Freeman, Dewey, Hadley, Myers, & Froelicher, 2006). Este proceso se explica en varios estudios mediante la utilización de fármacos que producen una desactivación simpática o bien parasimpática. Los bloqueantes β -adrenérgicos (propaprolol y metoprolol) evitan la estimulación cardíaca adrenérgica, la cual se da en nervios simpáticos (Arai et ál., 1989). En consecuencia, los cambios observados en la FC tras administrar dichos fármacos en sujetos sanos se podría atribuir a la acción parasimpática y la FC intrínseca. Por otro lado, la desactivación parasimpática farmacológica se da mediante la administración de atropina, por lo que en este caso, los cambios dados en FC se atribuirían a la acción simpática e intrínseca (que es insignificante durante o después del ejercicio). Así pues, al administrar un β -bloqueante en la fase de recuperación se observa que la recuperación temprana es consecuencia de la reactivación parasimpática. Consecuentemente, la desactivación simpática tiene una mayor importancia sobre la más tardía (Borresen & Lambert, 2008). Estas conclusiones son apoyadas al

observar que la norepinefrina en plasma, durante el primer minuto de recuperación, se mantenía constante o incluso aumentaba (Åstrand et ál., 2010). También se ha relacionado una rápida RFC con una actividad parasimpática mayor en estado de reposo (Araujo, 1985).

5.3.1 Métodos de cálculo

La RFC es calculada por diferentes franjas de tiempo, generalmente establecidas entre 30 segundos y 2 minutos. La mayoría de los estudios utilizan la diferencia entre la FC al final del ejercicio y la dada a los 60 segundos como variable dependiente. Lamberts (Robert Patrick Lamberts, Swart, Noakes, & Lambert, 2011) midió la FC en los últimos 15 segundos del ejercicio (aunque por lo general se media el último minuto de ejercicio); y al minuto de recuperación lo hizo entre los segundos 45-60 de dicho estadio. Este método parece más objetivo y menos dependiente que el momento exacto de cese de ejercicio (Al Haddad, Laursen, Chollet, Ahmaidi, & Buchheit, 2011; Lambert & Borresen, 2006).

La forma más sencilla y habitual de determinar la RFC es mediante la diferencia del valor máximo de FC y el que se produce en un momento concreto de recuperación. Normalmente se establece tras $1(\Delta\text{HR}_{60})$, $2(\Delta\text{HR}_{120})$ y $3(\Delta\text{HR}_{180})$

minutos de recuperación. Este método ha sido utilizado tradicionalmente por parte de la comunidad médica, por su sencillez y rapidez a la hora de aplicarlo (Al Haddad et ál., 2011; Al Haddad, Parouty, & Buchheit, 2012; Buchheit & Rabbani, 2014).

Si se utilizan los 2 minutos de recuperación para medir la RFC, la FC en este punto se encuentra más cerca de la línea base. Está bien documentado que los resultados difieren dependiendo del método (Lamberts, Swart, Noakes, & Lambert, 2009; Lamberts, Rietjens, Tjeldink, Noakes, & Lambert, 2010). Los valores de RFC a 1 y 2 minutos de recuperación deben ser contemplados como variables diferentes pero inseparables, puesto que el efecto tiempo no se ve reflejado si se utiliza tan solo una de ellas. Debido a la posible falta de información en estos intervalos de tiempo, los investigadores propusieron el ajuste de la curva descrita a una función exponencial. No obstante la simplicidad de ΔHR_{60} debe ser apreciada. Bosquet (Bosquet, Gamelin, & Berthoin, 2008) no observaron diferencias en la validez entre ΔHR_{60} , ΔHR_{120} y la función de ajuste. En cambio Lamberts (Lamberts, Lemmink, Durandt, & Lambert, 2004) hallaron un mayor coeficiente de variación en ΔHR_{120} que en ΔHR_{60} .

Es importante que se dé un consenso para decidir qué medidas se han de calcular. Los datos revisados sugieren que ΔHR_{60} tiene una mayor capacidad para detectar diferencias significativas durante el tiempo que ΔHR_{120} . La RFC generalmente se expresa en términos absolutos (lpm), aunque podría ser útil expresar sus parámetros en términos relativos a la RFC ($\Delta HR_{60,120,etc.}$) para minimizar las diferencias interpersonales (Blasco-Lafarga, Martínez-Navarro, & Mateo-March, 2013; Leicht & Allen, 2008).

Los investigadores en este campo pretenden ajustar el descenso de la FC al tiempo transcurrido por diversos métodos matemáticos, alternativos a los parámetros ya descritos. No obstante, durante la recuperación, el comportamiento de la FC puede resultar variablemente caótico, por lo que la medida de la FC en un momento exacto puede resultar imprecisa (Nussinovitch et ál., 2011). Conceptualmente, una curva de ajuste funcional a un periodo dado de recuperación ofrece el potencial tanto para minimizar el error asociado, como para aprovechar la información que pueda estar contenida en la forma general de la curva. Algunos investigadores propusieron en primera instancia una curva exponencial de forma general para expresar el comportamiento de la RFC. La FC es una variable dinámica, y es muy común observar que en su fase de recuperación decae asintóticamente hasta un valor que difiere bastante del dado

en la fase de reposo anterior al ejercicio, cuya diferencia puede ser de 10 a 20 lpm. Si se dan unas variaciones normales en la FC, el obligar a la curva a volver a valores similares de reposo podría ser un error. Ya que el coeficiente k controla la decaída de la curva, la modificación de esta permitió que el ajuste a la curva real de la FC mejorara. Freeman (Freeman et ál., 2006) observaron en un estudio con una muestra de 1.959 sujetos, que la curva descrita se ajusta a la curva real en torno al segundo 15, siendo la diferencia media no mayor a 2.4 lpm, lo que demuestra que la ecuación modificada es un excelente método para hallar la forma de la curva de la RFC. Posteriormente se han propuesto diversos métodos modificados: de ellos el más habitual es el que se realiza mediante el ajuste mono-exponencial. Por medio de este tipo de ajuste, Gordon (Gordon, Ditto, & D'Antono, 2012) demuestra que es necesario ajustar la RFC a una curva más cercana a los 3 minutos de recuperación que a los 2, ya que de este modo existe una mayor independencia de la intensidad de ejercicio (Al Haddad et ál., 2011; Freeman et ál., 2006; Leicht & Allen, 2008):

$$y=A_0 + A_{\max}(e^{-x/T180})$$

5.3.2. Uso clínico de la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

Desde hace siglos, incluso milenios, se ha relacionado la FC en reposo con el nivel de salud de los pacientes mediante mecanismos fisiológicos básicos (Nishime, Cole, Blackstone, Pashkow, & Lauer, 2000). En un principio se estudió la relación entre la FC basal y los cambios que se producían con tratamientos, por lo general farmacológicos (Cole, Foody, Blackstone, & Lauer, 2000).

Más adelante el interés se focalizó en el estudio de la FC en situaciones de estrés, atendiendo al aumento de esta al inicio del ejercicio y durante su fase más estable, en la que se produce una activación abrupta del SNS (respuesta cronotrópica), que es regulada por mecanismos centrales y periféricos durante la fase de ejercicio. Varios estudios determinaron que una respuesta cronotrópica dañada predice un mayor riesgo de muerte o de sufrir un evento cardíaco (Lahiri, Kannankeril, & Goldberger, 2008; Lauer, 2011).

A partir de los años ochenta, se empezaron a publicar estudios médicos utilizando la RFC como herramienta de medida, en los que se mostró que en los primeros 30-40 segundos de recuperación se produce una reactivación vagal, excepto si se

sufría cardiopatías (Imai et ál., 1994; Raczak et ál., 2005). En los noventa, se relacionó ciertos comportamientos de la decaída de la FC tras el ejercicio con la mortalidad. Se estableció la RFC como un marcador independiente tanto de mortalidad como de estado físico, respuesta cronotrópica y posibilidad de sufrir isquemia miocárdica (Cole et ál., 1999; Schwartz, 1998). Más adelante se estableció que un fallo en la RFC puede predecir todas las causas de mortalidad a causa del sistema circulatorio (Cole et ál., 2000), además de que también se relaciona con la resistencia a la insulina (posible diabetes) (Jae et ál., 2016), y con estados de sobrentrenamiento (burnout) (Kiviniemi, Tulppo, Hautala, Vanninen, & Uusitalo, 2014) u otro tipo de enfermedades (Buchheit, Simpson, Schmidt, et ál., 2013).

Hoy en día la RFC es utilizada para analizar la capacidad de los tratamientos sobretodo en cardiópatas, aunque en otro tipo de patologías empieza a ser muy usual, como es el caso de la diabetes, o la obesidad infantil. En este sentido, muchos autores coinciden en que el tratamiento más efectivo es el ejercicio y la dieta (Jensen, Camargo, & Bergamaschi, 2016; Lauer, 2011).

5.3.3. Efecto de la edad, el sexo y la raza sobre la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

Lógicamente, hay efectos sobre el ser humano que afectan a la RFC. Uno de ellos es la edad; la disfunción cardiovascular provocada por la esta produce que la RFC sea más lenta. Carnethon (Carnethon et ál., 2012) observó mediante un estudio longitudinal en una muestra de 3.446 sujetos, cómo varió la RFC tras un ejercicio submáximo a lo largo de 6 años teniendo en cuenta variables como el nivel de actividad física (y su continuidad), los hábitos saludables, la edad, la raza y el sexo. Así pues, explica que los hombres presentan una RFC más rápida que las mujeres (hecho que también afirman otros estudios (Brown & Brown, 2007), que la raza negra también obtiene mejores resultados que los caucásicos y los orientales (en este orden)(Sun et ál., 2016), y lo mismo sucede lógicamente, con aquellos que tienen hábitos saludables sobre los que no. Además, los autores destacan que lo más relevante en cuanto al hecho de tener una RFC más rápida es el nivel de actividad física, y que a mayor nivel de entrenamiento mayor es esta. Por lo que respecta a aquellos sujetos que reducían el tiempo de entrenamiento veían su RFC muy reducida. Otros estudios observaron cómo también el sexo tiene un efecto mayor sobre la RFC que el estatus de nivel físico, siendo más rápido en los hombres. Todos estos

resultados se ven apoyados por otros estudios (Arena & Cahalin, 2014; Best et ál., 2014; Borresen & Lambert, 2008; Buchheit et ál., 2011; Daanen et ál., 2012).

5.3.4. Recuperación de la Frecuencia Cardíaca como indicador de capacidad física

La RFC ha sido propuesta como un marcador de función autónoma y estatus de entrenamiento en atletas. Es bien sabido que la adaptación cardíaca al ejercicio provoca una bradicardia en reposo; por ello, lógicamente la vuelta a este estado tras el ejercicio debería ser más marcada en los sujetos entrenados (Kligfield et ál., 2003). La RFC puede ser definida como la cantidad de FC que se ve reducida, normalmente en minutos, después del cese de ejercicio. El SNA controla tanto el aumento de la FC tras el inicio de ejercicio como la decaída de esta tras la actividad física. Los SNS y SNP actúan de forma recíproca e inversa: cuando la FC decae, el SNP sufre una activación, mientras que el SNS se desacelera. Cuando el ejercicio se detiene, el gasto cardíaco se ve reducido por la regulación intrínseca (L Bosquet et ál., 2008; Trevizani, Benchimol-Barbosa, & Nadal, 2012).

Está bien documentado que los cambios en la RFC coinciden con los cambios en el estatus de capacidad física en

poblaciones enfermas (Patel et ál., 2014; Stanley, Peake, & Buchheit, 2013; Tiukinhoy, Beohar, & Hsie, 2003; Trevizani et ál., 2012; Yilmaz et ál., 2013), aunque no existe gran cantidad de estudios en poblaciones de atletas o deportistas (Barak et ál., 2011). La RFC es utilizada como un marcador de nivel de capacidad física, lo que tradicionalmente se indicaba en términos de VO_{2max} y VO_{2pico} en ejercicios exhaustivos (Buchheit & Gindre, 2006; Carnethon et ál., 2005; Cerretelli & Di Prampero, 1971; Dhoble, Lahr, Allison, & Kopecky, 2014). A pesar de que VO_{2max} guarda una estrecha relación con el nivel de actividad física en poblaciones generales, pierde esta capacidad predictiva para la capacidad aeróbica en sujetos bien entrenados y atletas de élite (Billat, Richard, Binsse, Koralsztein, & Haouzi, 1998; Mann et ál., 2014). Además, el error típico de medición de VO_{2max} es relativamente alto, lo cual hace de VO_{2max} un medidor poco fiable para monitorizar cambios en el entrenamiento en un periodo corto de tiempo. En contraste, parámetros como la RFC, potencia pico, y/o máxima velocidad de carrera tienen menores valores de error típico en sus mediciones, lo que los hace más sensibles para detectar cambios en el nivel de capacidad física a corto plazo (L Bosquet et ál., 2008; Buchheit & Gindre, 2006; Daanen et ál., 2012; Freeman et ál., 2006).

Al reportar aquellos estudios que observaron el efecto del ejercicio sobre la RFC, encontramos que una pequeña porción

utilizan muestras sanas o con cierto nivel de entrenamiento. Aquellos que sí usan este tipo de muestra, utilizan metodologías tanto longitudinales como transversales diferenciando niveles de capacidad física y/o nivel de entrenamiento, tipos de entrenamiento, protocolos de medida y adaptaciones a disciplinas deportivas diferentes (Carnethon et ál., 2005; Heffernan, Fahs, Shinsako, Jae, & Fernhall, 2007; Twist & Highton, 2013; Yamamoto, Miyachi, Saitoh, Yoshioka, & Onodera, 2001); y también se puede encontrar algún estudio descriptivo poblacional. En las investigaciones transversales encontramos la medición de la RFC tras la realización de test máximos o submáximos en prácticamente su totalidad. La mayoría de estos estudios determinan la RFC tras una sola intensidad de ejercicio (Borresen & Lambert, 2009).

5.3.5. Efecto del ejercicio crónico sobre Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

A continuación, se va a exponer el resultado de las investigaciones de diferentes autores (tabla 1). En primer lugar, Darr (Darr, Bassett, Morgan, & Thomas, 1988) encontró una recuperación más rápida de la FC en sujetos entrenados que en no entrenados; por su parte, Dixon (Dixon, Kamath, McCartney, & Fallen, 1992) mostró que la FC fue recuperada más rápidamente en sujetos muy entrenados en larga distancia (n=10) que en

sujetos sedentarios (n=14); por otro lado, Du (Du et ál., 2005) reflejó que la RFC fue más rápida en 6 corredoras de maratón bien entrenadas que en 8 mujeres no activas físicamente; por el contrario, Bosquet (Laurent Bosquet, Gamelin, & Berthoin, 2007) no halló diferencias en la RFC entre dos grupos, uno con un alto consumo de oxígeno y el otro con uno menor, en relación con la velocidad máxima de carrera; Danieli (Danieli et ál., 2014) encontró diferencias significativas entre sujetos entrenados y sedentarios en todos los parámetros de la RFC, en sujetos jóvenes con un test submáximo en cicloergómetro; por último, Buchheit (Buchheit et ál., 2008) observó que la RFC fue mayor en jugadores de fútbol sub-15 que en sub-17 tras un test submáximo, en el que la estratificación se realizó mediante dos grupos con valores de VO_{2max} en relación a la velocidad máxima de carrera.

Tabla 1. Estudios citados referidos al efecto del ejercicio crónico sobre RFC

Autor y año	N (género)	Grupos (Nº)	Criterio de selección de grupos	Medidas
Darr, 1988	20 (M)	4 (5)	V entrenamiento y edad	ΔHR_{60} y otros
Dixon, 1992	24 (M)	2 (10 y 14)	V entrenamiento	ΔHR_{300}
Du, 2005	14 (F)	2 (6 y 8)	V entrenamiento	ΔHR_{60} y otros
Bosquet, 2008	26 (M y F)	2 (13)	% VO_{2max}	ΔHR_{60}
Danieli, 2014	60 (M y F)	2 (30)	V entrenamiento	$\Delta HR_{30, 60, 120}$
Buchheit, 2010	33 (M)	2 (13)	rendimiento y edad	ΔHR_{60}

Así pues, podemos concluir que mayormente se encuentran diferencias entre sujetos entrenados y sedentarios (o no entrenados) por la RFC, por lo que podemos afirmar que la realización de ejercicio crónico tiene un efecto muy marcado sobre la RFC.

Como explica Daanen (Daanen et ál., 2012) en su revisión, en este tipo de estudios hay que tener en cuenta todas las posibles limitaciones o errores de diseño a la hora de interpretar los resultados. El estudio de Bosquet et ál (Laurent Bosquet et ál., 2007), que no halló diferencias entre dos grupos, podría tener una limitación en cuanto al hecho de determinar el nivel de capacidad física por el VO_{2max} . Por lo que respecta al estudio de Buchheit (Buchheit et ál., 2008) podemos decir que no hubo diferencias entre sujetos con mayor o menor velocidad de carrera realizada, aunque cabe destacar que ninguna otra variable para determinar el estatus de capacidad física mostró diferencias.

5.3.6. Efecto del ejercicio agudo sobre la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

En los estudios longitudinales encontrados, se observa cómo el periodo de tiempo de medición es mayor, durante o después de aplicar un método de entrenamiento para mejorar o

mantener la capacidad física (tabla 2). Buchheit (Buchheit, Chivot, et ál., 2010) no halló cambios en la RFC durante las tres semanas de campus de entrenamiento de fútbol. Borresen (Borresen & Lambert, 2008) mostró que la RFC se mantuvo constante en los sujetos que mantuvieron su intensidad, descendió (RFC más lenta) en aquellos que aumentaron su intensidad de entrenamiento, y aumentó (RFC más rápida) en aquellos que redujeron la intensidad de su entrenamiento durante un periodo de dos semanas; cabe señalar que en este estudio se determinó el nivel de capacidad física por otros medios a pruebas máximas. Lamberts (Robert P Lamberts et ál., 2009) observó un aumento en la RFC tras cuatro semanas de entrenamiento de alta intensidad. Se encontró una fuerte relación entre el cambio RFC y el tiempo utilizado para realizar una prueba de 40km de distancia pedaleando. En otro estudio de Lamberts (R. P. Lamberts et ál., 2011), se pretendía observar la validez y capacidad de predicción de un test novel de la RFC. El nivel de capacidad física y la RFC no cambiaron, mientras que el error típico de RFC fue de 2 puntos.

Sugawara (Sugawara, Murakami, Maeda, Kuno, & Matsuda, 2001) mostró una mejora en la RFC en diez sujetos sanos sedentarios durante un programa de entrenamiento de ocho semanas, la cual volvió a la línea base a las cuatro semanas

siguientes de desentrenamiento. Es importante precisar que no se hicieron medidas en semanas posteriores.

Hautala (Hautala et ál., 2006) mostró una mejora en VO_{2max} en ochenta sujetos sedentarios (hombres y mujeres) tras dos semanas de entrenamiento aeróbico, mientras que las variables de la RFC no mostraron cambios. De cualquier modo, la potencia máxima de ejercicio no mostró mejoras por lo que no existieron cambios en el estatus de capacidad física.

Desde que aumentó la participación de ancianos en eventos deportivos las investigaciones en esta población han sido más comunes. Cabe destacar el estudio de Giallauria (Giallauria et ál., 2005), que muestra mejoras considerables de VO_{2max} y RFC tras ocho semanas de entrenamiento. De nuevo, no hubo mejora en la potencia pico de ejercicio.

Tabla 2. Estudios citados referidos al efecto del ejercicio agudo sobre RFC

Autor y año	N (género)	Grupos (Nº)	Criterio de selección	Medidas	Duración
Buchheit, 2010	33 (M)	1 (33)		ΔHR_{60}	3 semanas
Borresen, 2008	28 (M y F)	3 (9, 8 y 11)	Adaptación	ΔHR_{60}	2 semanas
Lamberts, 2010	14 (F)	2 (8 y 6)	aumento RFC	ΔHR_{60} y otros	4 semanas
Lamberts, 2011	15 (M)	1 (15)		ΔHR_{60}	5 semanas
Sagawara, 2001	10 (M)	1 (10)		ΔHR_{30}	8 semanas
Hautala, 2006	95 (M y F)	2 (80 y 15)	V entrenamiento	ΔHR_{60}	2 semanas
Giallauria, 2005	32 M y F)	2 (16)	Aleatorio	ΔHR_{60} y otros	8 semanas

Por lo tanto, se puede decir que en los estudios longitudinales revisados existen tres subdivisiones: en primer lugar, cambios en la RFC con cambios concomitantes en el estatus de capacidad física (R. Lamberts, Swart, Capostagno, Noakes, & Lambert, 2010; Robert P Lamberts et ál., 2009; Sugawara et ál., 2001); en segundo lugar, sin cambios en la RFC ni en la capacidad física (Buchheit, Mendez-Villanueva, et ál., 2010; R. P. Lamberts et ál., 2011); y finalmente, cambios en la RFC sin reportar exactamente cómo cambia el estatus de capacidad física (Borresen & Lambert, 2007; Giallauria et ál., 2005; Hautala et ál., 2006). Basándonos en estos estudios, podemos afirmar que se da una mejora de la RFC cuando así ocurre con la capacidad física, tanto si el entrenamiento se realiza aguda como crónicamente.

5.3.7. Efecto del tipo de ejercicio sobre la Recuperación de la Frecuencia Cardíaca

En contraposición a la VFC, la medida de la RFC debe estar precedida de ejercicio. Obviamente, a intensidades más altas la FC tendrá valores mayores y, en consecuencia, el descenso de la FC será más prolongado tras el cese de ejercicio. La RFC desde ejercicios máximos parece ligeramente más lenta, principalmente porque la activación simpática puede continuar activa en la recuperación más temprana. No obstante, algunos

autores (Buchheit, Papelier, Laursen, & Ahmaidi, 2007; Dupuy, 2012; Lambert & Borresen, 2006; R. P. Lamberts et ál., 2010) recomiendan utilizar ejercicios superiores al 80% de su FC_{max} , debido a que encontraron un error típico menor al evaluar la repetitibilidad en sujetos entrenados o sanos. Cabe destacar que la muestra seleccionada en estos estudios y/o los parámetros utilizados pueden tener un gran efecto sobre los resultados (Buchheit, Simpson, Al Haddad, Bourdon, & Mendez-Villanueva, 2012).

El modo de ejercitarse y su duración afectan a la RFC. Ya que el cuerpo humano se adapta al ejercicio, se observan diferencias en la RFC entre distintos tipos de ejercicio: los deportistas entrenados en disciplinas de transición aeróbico-anaeróbico tienen una RFC temprana más rápida que aquellos entrenados en disciplinas de resistencia (McDonald, Grote, & Shoepe, 2014), aunque a partir del primer minuto de recuperación los deportistas de resistencia tienen mayor recuperación. Además se observan diferencias entre distintos ejercicios de resistencia (Bouchard & Rankinen, 2001).

La RFC también presenta valores más altos tras un ejercicio de carrera que de pedaleo, lo que está relacionado con la diferencia en demandas energéticas. Otsuki (Otsuki et ál., 2007) observó que los sujetos entrenados tanto en fuerza como

en resistencia presentan una mejor RFC comparados con controles, y Lamberts et ál (Robert P Lamberts et ál., 2009) encontró una mejora en la capacidad física en ciclistas bien entrenados tras un entrenamiento HIIT, utilizando parámetros de RFC, VO_{2max} y potencia pico. La poca cantidad de estudios como estos sugiere que se ha de estudiar el efecto de diferentes tipos de entrenamiento sobre la RFC (Daanen et ál., 2012).

Basándonos en los mencionados cofundadores, el uso de un protocolo de ejercicio estandarizado anterior a la medición de la RFC es preciso para la obtención de resultados consistentes (Bouchard & Rankinen, 2001; Leicht & Allen, 2008). La estandarización debe marcar tanto la intensidad y duración como la frecuencia. Ejemplos de este proceso de estandarización son el HIMS (Robert P Lamberts et ál., 2004; Robert P Lamberts et ál., 2009) un test submáximo en carrera consistente en cuatro etapas que pretenden llegar al 90-95% de la FC_{max} , desde los cuales se establece la RFC, y también el test 5'-5', un test en carrera submáximo, en el que los sujetos corren durante 5 minutos a 9 km/h, seguido de 5 minutos en posición sentada durante la que se mide la RFC. Ya que estas pruebas tienen una intensidad fijada en términos absolutos, un cambio en la condición física resultaría en una FC distinta (Martin Buchheit, Ben M Simpson, Laura A Garvican-Lewis, et ál., 2013).

Un estudio de Lamberts (R. P. Lamberts et ál., 2011) muestra que este posible efecto de confusión puede ser minimizado si la FC llega a valores del 86% al 94% de FC_{max} . La minimización de los errores de medida mejora la habilidad de detectar pequeños cambios entre intervenciones (Daanen et ál., 2012; Leicht & Allen, 2008; Ricardo, de Almeida, Franklin, & Araujo, 2005).

Otro camino hacia estas limitaciones es fijar la FC submáxima antes de realizar la medición de la RFC. Este acercamiento ha sido adoptado en un test de pedaleo submáximo, el cual está diseñado para acabar al 90% de FC_{max} (R. P. Lamberts et ál., 2011). Este método asegura que la medición se realiza desde los mismos valores submáximos y así se reducen las variaciones de medición (Leicht & Allen, 2008).

5.3.8. Factores ambientales

La dificultad para liberar el calor corporal aumenta cuando la temperatura y humedad ambientales son altas, no existe viento, y el cuerpo es radiado por el sol (Ladell, 1951). En estos casos de tirantez climática los vasos sanguíneos se dilatan a nivel cutáneo, resultando una reducción en el retorno venoso, lo que se ve compensado por un aumento de la FC. En la línea de estas observaciones, Kilgour (Kilgour, Gariépy, & Rehel, 1993)

encontró una RFC más lenta tras un esfuerzo en ambiente caluroso que en una con condiciones normo-termales. El mismo mecanismo se ve afectado en circunstancias de reposo (Parouty et ál., 2010).

TEST DE CAPACIDAD FÍSICA

Los test de capacidad física son protocolos de ejercicio específicos conjugados con mediciones, por lo general sencillas, que facilitan resultados cuantitativos que determinan el nivel del sujeto expuesto a tal ejercicio (Wasserman, Hansen, Sue, Whipp, & Froelicher, 1987). Existen diferentes métodos para determinar la capacidad física de un sujeto dependiendo de la capacidad física que se pretenda evaluar, ya sea resistencia aeróbica, fuerza, flexibilidad, etc. En este caso nos centraremos en aquellos que determinan la capacidad aeróbica general, ya que suele ser el más utilizado como marcador general de capacidad física (Laursen, 2010; Plews et ál., 2013). Estos test empiezan a publicarse en los años ochenta, y a partir de entonces su uso fue extendiéndose y convirtiéndose en una herramienta muy relevante en el deporte, sobre todo *amateur*, debido a su simplicidad. Por ello, aquellos más utilizados han tenido multitud de propuestas de modificación por parte de autores distintos a los originales, con el objetivo de aumentar la fiabilidad de estos; incluso se han propuesto nuevos test para poblaciones especiales como obesos (Laukkanen, Oja, Pasanen, & Vuori, 1992) o ancianos (Coleman et ál., 1987). Estos test utilizan diferentes mediciones para determinar el nivel de capacidad física. Algunos

miden la FC, otros la velocidad, la distancia o la RFC para determinar el nivel de ejecución de la prueba por VO_{2max} teórico, una escala de valores u otros. (Vianna, Werneck, Coelho, Damasceno, & Reis, 2014). A continuación se clasifican algunos de los test más utilizados para este fin.

1. CAPACIDAD AERÓBICA POR FRECUENCIA CARDÍACA

Los test que presentamos a continuación determinan el nivel de capacidad física a partir del uso de la FC como medida principal, bien al final del ejercicio, durante o en reposo.

1.1. Test de Rockport (Test de la milla)

Determina el VO_{2max} en poblaciones a las que se les supone una baja condición física. Consiste en recorrer andando una milla (1.609,3 metros), controlando la FC al terminar, así como el tiempo empleado. La determinación del VO_{2max} se realiza a partir de la siguiente ecuación (Coleman et ál., 1987):

$$VO_{2max}=132,6-(0,17xPC)-(0,39xEdad)+(6,31xS)-(3,27xT)-(0,156xFC)$$

Donde PC: peso corporal; S: sexo (0: mujeres, 1: hombres); T: tiempo en minutos; FC: frecuencia cardíaca.

1.2. Test de Conconi

Valora la potencia aeróbica determinando el umbral anaeróbico. Consiste en realizar un esfuerzo de intensidad progresiva en carrera o sobre una bicicleta controlando la FC. Según Conconi la FC aumenta a medida que aumenta la intensidad del ejercicio, hasta llegar un momento en que esta se estabiliza a pesar de incrementar su intensidad. Este punto de depleción se corresponde con el umbral anaeróbico (figura 7).

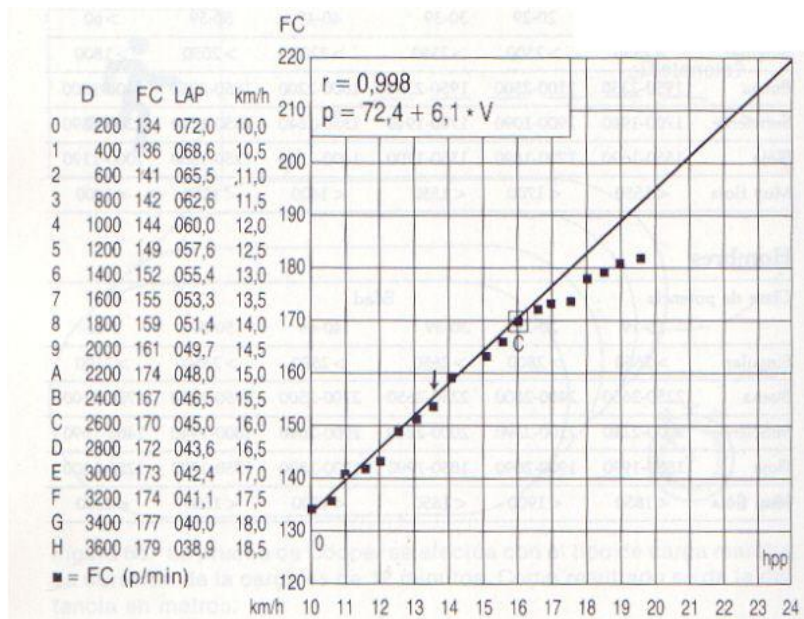


Figura 7. Gráfico de resultados tras el test de Conconi, donde se observa el punto de inflexión en la FC el cual determinaría el momento en el que se alcanza el umbral anaeróbico (F Conconi et ál., 1996)

El protocolo para carrera propuesto por Conconi consiste en correr en una pista de atletismo de 400 metros, incrementando la velocidad de carrera cada 200 metros hasta el agotamiento. En cambio para bicicleta consiste en incrementar la velocidad cada kilómetro hasta llegar al agotamiento. La valoración de la potencia aeróbica se realiza según la máxima velocidad alcanzada y la tabla con la baremación correspondiente. El punto que corresponde al umbral anaeróbico aparecerá a distinta velocidad para cada persona pudiéndose valorar en una tabla con la baremación pertinente (Ferrari Conconi et ál., 1982).

1.3. Test del índice de Ruffier

Determina la adaptación cardiovascular al esfuerzo. Se mide la FC en reposo (P). El sujeto, de pie y con las manos en la cadera debe realizar 30 flexo-extensiones de piernas en 45 segundos. Al finalizar el ejercicio se toman nuevamente las pulsaciones. (P1). Un minuto después del ejercicio, se repite nuevamente la toma de pulsaciones (P2). Se aplica la siguiente ecuación (Rodríguez Cabrero, García Aparicio, García Pastor, Salinero, & Gonzá, 2015):

$$(P + P1 + P2 - 200): 10$$

El resultado es un valor que se conoce como Índice de Ruffier. Este índice se puede valorar en la tabla siguiente (figura 8).

Test de Ruffier				
NIVEL DE CONDICIÓN FÍSICA				
MUY MAL	MAL	MEDIO	BUENA	MUY BUENA
> 16	11 – 15	6 – 10	1 – 5	≤ 0

Figura 8. Tabla de baremo para el test de Ruffier (EDUCATION, 2004).

2. CAPACIDAD AERÓBICA POR LA VELOCIDAD

A continuación, se observan algunos test que miden la velocidad de ejecución como determinante para valorar el nivel de capacidad física.

2.1. Test de Cooper (Test de los 12 minutos).

Valora la resistencia aeróbica y determina el VO_{2max} . Consiste en cubrir la máxima distancia posible durante doce minutos de carrera continua. Se anotará la distancia recorrida al finalizar los doce minutos. El resultado se puede valorar en la tabla de baremo correspondiente (Cooper, 1968).

Teóricamente, una carga constante que provoca el agotamiento a los doce minutos de iniciarse correlaciona significativamente con el valor del VO_{2max} . Según esto, el VO_2 máximo se puede determinar según la siguiente ecuación:

$$VO_2 = 22,351xDistancia(Km) - 11,288$$

2.2. Test de *Course Navette* (Test de Leger-Lambert)

Valora la potencia aeróbica máxima determinando el VO_{2max} . Consiste en recorrer la distancia de 20 metros ininterrumpidamente y tantas veces como sea posible, a un ritmo progresivo ascendente que se marca de modo auditivo: cada señal se corresponde con el final del estadio para recorrer los 20 metros. El resultado se puede valorar en la tabla con la baremación correspondiente (figura 9)(Leger & Lambert, 1982).

Etapa	Vel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	8,5	20	40	60	80	100	120	140								
2	9	160	180	200	220	240	260	280	300							
3	9,5	320	340	360	380	400	420	440	460							
4	10	480	500	520	540	560	580	600	620							
5	10,5	640	660	680	700	720	740	760	780	800						
6	11	820	840	860	880	900	920	940	960	980						
7	11,5	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180					
8	12	1200	1220	1240	1260	1280	1300	1320	1340	1360	1380					
9	12,5	1400	1420	1440	1460	1480	1500	1520	1540	1560	1580					
10	13	1600	1620	1640	1660	1680	1700	1720	1740	1760	1780	1800				
11	13,5	1820	1840	1860	1880	1900	1920	1940	1960	1980	2000	2020				
12	14	2040	2060	2080	2100	2120	2140	2160	2180	2200	2220	2240	2260			
13	14,5	2280	2300	2320	2340	2360	2380	2400	2420	2440	2460	2480	2500			
14	15	2520	2540	2560	2580	2600	2620	2640	2660	2680	2700	2720	2740	2760		
15	15,5	2780	2800	2820	2840	2860	2880	2900	2920	2940	2960	2980	3000	3020		
16	16	3040	3060	3080	3100	3120	3140	3160	3180	3200	3220	3240	3260	3280		
17	16,5	3300	3320	3340	3360	3380	3400	3420	3440	3460	3480	3500	3520	3540	3560	
18	17	3580	3600	3620	3640	3660	3680	3700	3720	3740	3760	3780	3800	3820	3840	
19	17,5	3860	3880	3900	3920	3940	3960	3980	4000	4020	4040	4060	4080	4100	4120	4140
20	18	4160	4180	4200	4220	4240	4260	4280	4300	4320	4340	4360	4380	4400	4420	4440

Figura 9. Tabla de resultados del test *Course Navette*, donde se estratifican los estadios y la distancia recorrida en cada uno, mediante el que se puede extraer el nivel aeróbico del sujeto (EDUCATION, 2004)

El VO_{2max} se calcula a partir de la velocidad de carrera que alcanzó el sujeto en el último periodo que soportó, según la siguiente ecuación:

$$VO_{2max} = 5,857 \times V(\text{Km/h}) - 19,458$$

2.3. Test del kilómetro

Valora la resistencia aeróbica-anaeróbica. Consiste en recorrer la distancia de un kilómetro en el menor tiempo posible y se contrasta el tiempo empleado (en minutos) en la tabla (figura 10) correspondiente (Haff & Dumke, 2012).

	18-30 años	31-40 años	41-55 años	>55 años
Excelente	< 3,15	<3,20	<3,30	<3,45
Muy bueno	3,15-3,30	3,21-3,35	3,31 - 3,50	3,46 - 4,00
Bueno	3,31-3,50	3,36-3,55	3,51 - 4,15	4,01 - 4,25
Normal	3,51-4,15	3,56-4,20	4,16 - 4,50	4,26 - 5,00
Regular	4,16-4,50	4,21-4,55	4,51 - 5,00	5,01 - 5,40
Malo	4,51-5,30	4,56-5,35	5,10 - 6,00	5,41 - 6,45
Muy Malo	> 5,30	> 5,35	> 6,01	> 6,46

Figura 10. Tabla de evaluación de resultados correspondiente al test del kilómetro (Rodríguez, Valenzuela, Gusi, Nacher, & Gallardo, 1998)

3.CAPACIDAD AERÓBICA POR RECUPERACIÓN DE LA FRECUENCIA CARDÍACA

Los siguientes test valoran el nivel de capacidad física dependiendo de la rapidez con la que la FC vuelve a niveles más basales después de un ejercicio.

3.1. CAT-Test (Test de Chanon y Stephan)

Determina el VO_{2max} , los umbrales aeróbico y anaeróbico además de la curva de RFC. Consiste en realizar tres pruebas de intensidad y distancia crecientes separadas entre sí por 10 minutos de recuperación. La primera prueba consta de una distancia de 800, 1.000 o 1.200 metros (dependiendo de la capacidad supuesta del sujeto), en un tiempo aproximado de 6-8 minutos y a una FC de en torno a 140 lpm. En la segunda prueba se debe recorrer 800, 1.000 o 1.500 metros, en un tiempo aproximado de 6-8 minutos y con una FC en torno a 160 lpm. En la tercera, se ha de recorrer 1.000, 1.500 o 2.000 metros, y a una intensidad interna en torno a la máxima. Al finalizar, se tomará el pulso en los primeros 30 segundos iniciales de cada uno de los siguientes cinco minutos, y las cifras obtenidas se reflejarán en un gráfico cuya curva nos proporcionará las indicaciones sobre la recuperación del sujeto. El índice de VO_{2max} , los umbrales aeróbico y anaeróbico y la curva de recuperación de la frecuencia cardíaca se determinan a partir de las tablas de baremación (García, 2004).

3.2. Test de Zintl

Determina la capacidad de recuperación cardíaca y consiste en la toma de la FC tras un esfuerzo de carga constante

(como el test de Cooper), determinando el tiempo en que el sujeto vuelve a una FC de 100 lpm. La FC se toma en lapsos de 10 segundos. La valoración se realiza, según el tiempo de recuperación, en la tabla diseñada para tal fin. También se puede realizar tras cargas máximas de corta duración (frecuencia cardíaca máxima), anotando la frecuencia cardíaca a los cinco minutos de la realización de la prueba. La valoración se realiza mediante el baremo correspondiente (Zintl, 1991).

4. NUEVOS MÉTODOS PARA DETERMINAR EL RENDIMIENTO

En los últimos años el avance tecnológico ha facilitado la implementación de diferentes test en instrumentos dedicados a la actividad física, y así poder utilizar métodos matemáticamente más complejos para determinar el nivel de actividad física. Es el caso de la incorporación de diferentes test en monitores de FC (Polar, Finlandia) o la valoración de intensidad de ejercicio por tapices rodantes o cicloergómetros, como por ejemplo el Índice de Rendimiento o PI (siglas anglosajonas de Performance Index) (Segui, 2015), desarrollado por la marca comercial Technogym (Gambettola, Italia).

4.1. Performance Index

El PI se desarrolla a partir de la relativización de las fórmulas de cálculo de METS (Cal/h)/peso, VO_2 (METSx3.5) y FC_{max} (220-edad) teórica a una escala del 1 al 99, por lo que para determinar el nivel de actividad física tan solo precisa la edad, el peso y el tiempo. Su fórmula se describe tal que así:

$$PI=100x((VO_2/\%FC_{max})-0.1)/0.9$$

4.2. Test de 18 minutos (Arduini y cols.)

Este test, el cual se pretende examinar en el presente trabajo, utiliza la RFC para determinar la capacidad física de los sujetos expuestos. El protocolo de ejercicio se realiza en 18 minutos (figura 11), que se dividen en las siguientes fases:

-Fase 1: con una duración de tres minutos pretende llegar al 65% de la FC_{max} teórica de forma paulatina.

-Fase 2: se debe mantener la FC a la misma intensidad (65% de la FC_{max} teórica) durante tres minutos.

-Fase 3: fase de recuperación, en la que se debe permanecer inmóvil durante tres minutos.

-Fase 4: del mismo modo que en la Fase 1 se pretende llegar al 80% de la FC_{max} teórica al cabo de tres minutos.

-Fase 5: se ha de mantener la FC al 80% de la FC_{max} teórica durante tres minutos.

-Fase 6: fase de recuperación de tres minutos al igual que en la Fase 3.

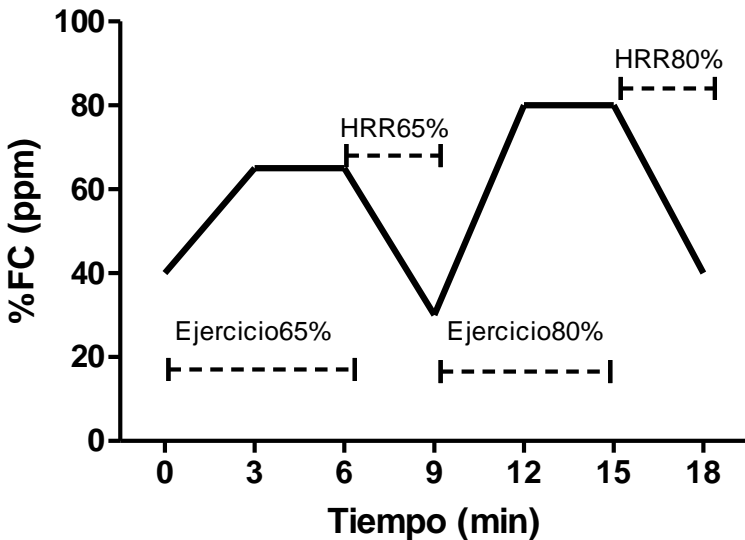


Figura 11. Diseño del protocolo propuesto para determinar la RFC posejercicio

Las mediciones que se usan son las del último minuto de ejercicio en cada una de las intensidades, y los tres minutos de ambas recuperaciones. De este modo, se utilizará la media del

último minuto de cada fase de ejercicio como FC_{\max} alcanzada. Y a los segmentos propios de las recuperaciones se les aplicarán los métodos matemáticos propios de los parámetros que mayor consenso han provocado entre los autores de estudios referidos a la RFC (Romagnoli et ál., 2014), los cuales se presentan a continuación (figura 12):

- I) RFC cinética: los datos obtenidos durante los tres minutos de recuperación, se ajustan a la siguiente función mono-exponencial por técnica iterativa.

$$y=A_0 + A_{\max}(e^{-x/T180})$$

- II) T30: los primeros treinta segundos de FC son transformados en su logaritmo natural (ln) utilizándose una regresión lineal opuesta al tiempo, y el recíproco negativo de la pendiente de la función mostrada (-1/pendiente) para interpretar esta variable como la constante de tiempo de la recuperación rápida.
- III) T30_{min}: debido a los altos valores de FC al inicio de la recuperación, el cálculo de T30 se podría ver afectado. Así pues, se utiliza otra regresión de ln de FC opuesta al tiempo usando todos los datos posibles en segmentos de treinta segundos durante el primer

minuto de recuperación, eligiendo la menor constante de tiempo ($-1/\text{pendiente}$ más pronunciada) como índice de reactivación parasimpática. Se propone una modificación similar por otros autores.

IV) RFC absoluta (ΔHRR): se calcula la diferencia neta entre la FC en el cese de ejercicio (media del último minuto) y la FC en los minutos 1, 2 y 3 (ΔHR_{60} , ΔHR_{120} , ΔHR_{180}).

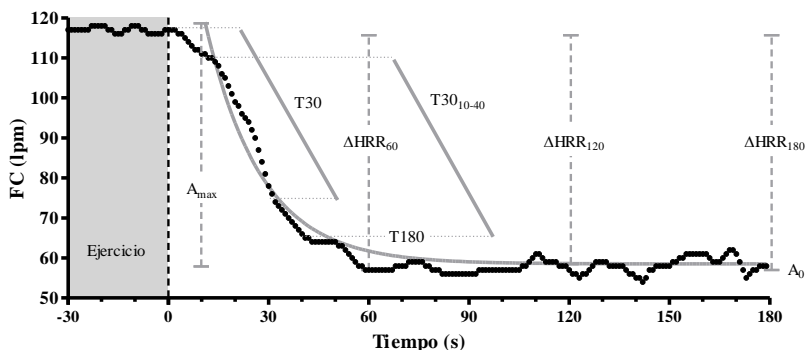


Figura 12. Representación gráfica de las variables utilizadas para determinar la RFC

Además de estos parámetros, en este estudio también se propone uno novel, con el objetivo de aportar mayor información acerca de la capacidad física. Este parámetro se calcula a partir del Área Bajo la Curva (ABC, o AUC en inglés); un

cálculo sencillo de aplicar a gráficos que describen curvas (figura 13). En ciencias médicas, es muy utilizado para determinar la captación de nutrientes o fármacos relativizada al tiempo, ayudando a predecir efectos biológicos como la toxicidad o eficacia. También se utiliza para analizar las observaciones que se hacen durante el tiempo por un individuo, como en estudios longitudinales o en pruebas de *relación dosis-respuesta* (Everitt, 1994).

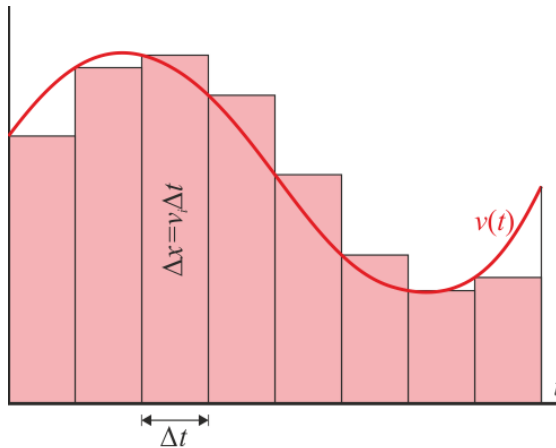


Figura 13. Área Bajo la Curva determinada de modo geométrico en un gráfico curvo

Existen dos modos de calcular el área bajo una curva: geoméricamente o por cálculo diferencial (mediante una función) (Olmo, 2015). En este caso, se utiliza una medición diferencial que resulta en magnitud lpm/tiempo (figura 13), y se

propone la medición del AUC descrita por la decaída de la FC en la fase de recuperación. Esta medición se lleva a cabo desde el cese del ejercicio hasta pasados uno, dos y tres minutos, por lo que denominamos a estas tres variables $_{auc}HRR_{60}$, $_{auc}HRR_{120}$ y $_{auc}HRR_{180}$ respectivamente.

Al determinar el AUC de un gráfico como el de la RFC, en el que existe cierta variabilidad (la curva no es uniforme), y atendiendo a la individualidad de las medidas, podríamos perder información en estos aspectos. Por este motivo, se modificó esta variable ($_{auc}HR$) de modo que se determinó el % del área total (AT) recuperada, al dividir el AUC multiplicado por 100 al área total de cada segmento, por lo que a una RFC más rápida corresponderá un valor mayor. Así pues, la RFC relativa al área bajo la curva ($_{auc}HRR$) se calcula a partir de la FC_{max} y el tiempo: lpm (eje Y) vs. tiempo (eje X), desde el cese del ejercicio hasta pasados 60, 120 y 180 segundos ($_{auc}HRR_{60}$, $_{auc}HRR_{120}$ y $_{auc}HRR_{180}$):

$$\begin{aligned} _{auc}HR_{60} &= (100 \times _{auc}HRR_{60}) / AT \\ _{auc}HR_{120} &= (100 \times _{auc}HRR_{120}) / AT \\ _{auc}HR_{180} &= (100 \times _{auc}HRR_{180}) / AT \end{aligned}$$

MOTIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El principal motivo para realizar la presente investigación es el de observar la validez de una sencilla herramienta para la evaluación del comportamiento del organismo como respuesta al ejercicio.

La utilización de la RFC como medida indirecta de adaptación cardiovascular queda demostrada anteriormente. Sin embargo, no existen muchos estudios que evalúen la validez de los métodos utilizados para determinar la RFC. Respecto a esto, se optó por intensidades submáximas de ejercicio porque no se ven afectados por problemas de reproducibilidad como ocurre con los ejercicios máximos, además de poder ser realizado sin presencia de personal especializado (toda prueba máxima debe ser supervisada por un médico).

Entre las ventajas de este protocolo, cabe destacar el ahorro, tanto de tiempo (su duración es de dieciocho minutos), de material (precisa de la medición de FC), así como de medios económicos (no es necesaria la contratación de personal especializado). Además, la determinación de intensidades mediante valores relativos (%FC) hace extrapolable su utilización a prácticamente todos los sectores poblacionales. Por último, las intensidades submáximas también facilitan que este protocolo se pueda utilizar en muestras muy diversas.

Además la inclusión de un nuevo parámetro para medir la RFC ($_{auc}HRR_{(60,120,180)}$) puede dar una mayor sensibilidad. Para que el consenso entre investigadores que trabajan en este campo se produzca, es necesario tanto validar las herramientas utilizadas, como incluir nuevos métodos que puedan dar mayor sensibilidad a los datos aportados por las investigaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL

El objetivo principal de esta tesis es determinar la validez del protocolo propuesto como herramienta para la descripción de la recuperación de la frecuencia cardíaca.

Así pues, este se desglosa en los siguientes **objetivos específicos**:

1. Determinar diferencias metabólicas entre las distintas intensidades submáximas del protocolo propuesto.
2. Analizar si existen diferencias entre las intensidades planteadas mediante los marcadores de RFC usualmente utilizados.
3. Analizar si existe correlación entre las intensidades expuestas mediante los marcadores de RFC usualmente utilizados.
4. Estudiar la reproducibilidad de los marcadores utilizando el protocolo propuesto tras ejercitarse al $65\%FC_{\max}$.
5. Estudiar la reproducibilidad de los marcadores utilizando el protocolo propuesto tras ejercitarse al $80\%FC_{\max}$.
6. Analizar si los resultados para $aucHRR_{(60,120,180)}$ son coyunturales a las adaptaciones de los sujetos con

respecto al resto de parámetros utilizados para determinar la RFC.

7. Observar si el protocolo propuesto es sensible a los cambios a corto plazo por un entrenamiento aeróbico.
8. Observar si el protocolo propuesto es sensible a los cambios a corto plazo por desentrenamiento tras adaptaciones aeróbicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

CRONOLOGÍA DE LAS DIVERSAS FASES

Tabla 3. Periodización de cada una de las fases de trabajo en el mes correspondiente y el año en que se realizaron. El año correspondiente se representa (año)

	E n	F e	M	A b	M a	J u	A g	S e	O c	N o	D i
Elección temática (2010)											
Revisión bibliográfica (2013-2016)											
Diseño experimental1 (2010)											
Diseño experimental2 (2013)											
Reclutación de la muestra1 (2010)											
Reclutación de la muestra2 (2013)											
Medición 1 (2010)											
Medición 2 (2010)											
Medición 3 (2013)											
Medición 4 (2013)											
Reducción de datos1 (2010)											
Reducción de datos2 (2013)											
Análisis estadístico1 (2010)											
Análisis estadístico2 (2013)											
Escritura/Corrección (2013-2016)											

En la tabla 3, observamos el marco temporal en que se sitúan cada una de las fases empleadas en este trabajo. Las mediciones 1 y 2 corresponden a las propias de la fase experimental primera, y la 3 y 4 a la fase experimental segunda. De igual modo ocurre con el resto de fases numeradas (Las numeradas con el 1 corresponden a la primera fase experimental y con el 2 a la segunda). Podemos observar que algunas de ellas ocupan varios años debido a la necesidad de diversos cambios con el transcurso del tiempo.

DISEÑO EXPERIMENTAL

De acuerdo con los objetivos establecidos, planteamos dos fases experimentales. En primer lugar, para dar respuesta a los objetivos 1-5, se diseñó un protocolo (figura 14) mediante el que se midiese la RFC tras dos intensidades distintas y realizando un re-test, para hallar las diferencias en cada variable entre ambas medidas a nivel intrasujeto.

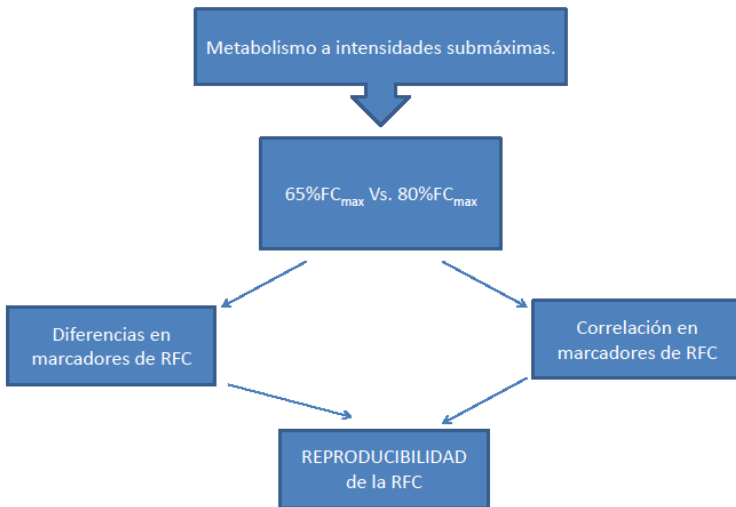


Figura 14. Conceptualización del diseño experimental de la primera fase

En segundo lugar, para dar respuesta los objetivos 6-8, se realizó un estudio longitudinal (figura 15) en el que se determinaron dos grupos: control y entrenados. El grupo de entrenados realizó un entrenamiento aeróbico de ocho semanas con aumento progresivo de la intensidad, tras lo cual, se someterían a un proceso de desentrenamiento de otras ocho semanas. Finalmente, se comparó mediante el test de RFC si existían diferencias entre el grupo de entrenados y el control, para observar si los cambios en la capacidad física se corresponden con aquellos que se den en la RFC.

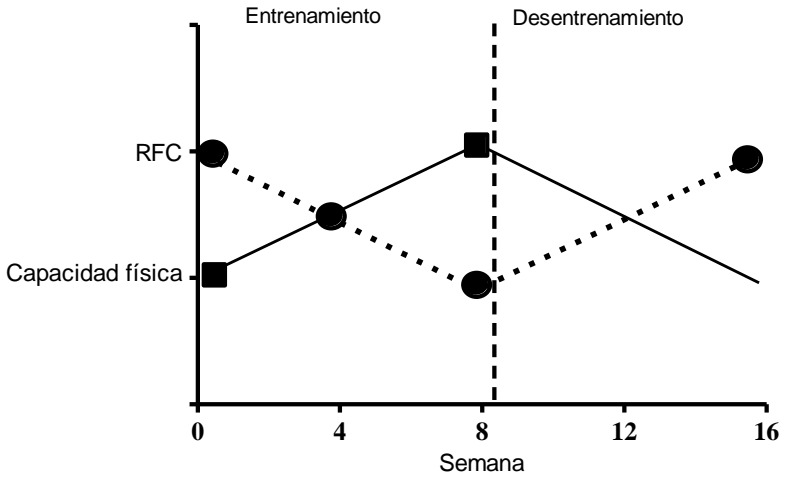


Figura 15. Conceptualización del diseño experimental de la segunda fase

A continuación, detallaremos los procedimientos realizados y métodos utilizados en cada una de las fases experimentales.

1. FASE EXPERIMENTAL 1

1.1. Muestra

Se reclutaron veintiún sujetos sanos (17 varones y 4 mujeres) mediante anuncios en la Universitat de València y la Universitat Politècnica de València. La muestra incluía sujetos sedentarios (tres horas o menos de actividad física n=12) y activos físicamente (más de tres horas de actividad física a la semana, n=9).

Previamente a la inclusión en esta fase experimental, todos los participantes fueron informados del propósito, los protocolos y procedimientos. Los sujetos que dieron su consentimiento por escrito fueron finalmente incluidos en la fase experimental.

Este experimento cumple con los principios éticos para la investigación médica en seres humanos establecidos en la Declaración de Helsinki de la Asamblea Médica Mundial y además, fue aprobado por el Comité Ético de la Universitat de València.

1.1.1. Criterios de inclusión

Por lo que se refiere a los criterios de inclusión y exclusión, se tomó como premisa que los participantes fueran sujetos sanos entre 20 y 30 años para ser incluidos en la fase experimental.

1.1.2. Criterios de exclusión

Los pacientes fueron excluidos de esta fase experimental en caso de cumplir alguno de los criterios detallados en la tabla 4. Fueron elegidos estos criterios por que podrían reflejar una gran varianza propia de los sujetos y no de las mediciones (Buchheit, 2012).

Tabla 4. Criterios de exclusión en la fase experimental 1.

Anomalías en el ECG en reposo y/o ejercicio

Uso de fármacos cronotrópicos

Obesidad (índice de masa corporal (IMC) > 30 kg/m²)

Uso de tabaco (>1 cigarrillo al día)

Presión arterial sistólica > 140 mmHg

Presión arterial diastólica >90 mmHg

1.2. Protocolos de ejercicio

Los participantes en esta fase experimental realizaron dos protocolos de ejercicio. En el primer test, se efectuó una

prueba incremental máxima en cicloergómetro para determinar la FC_{max} y el umbral láctico. Después, los sujetos realizaron tres pruebas submáximas para determinar la RFC. La primera de ellas se hizo a modo de familiarización, mientras que las otras dos para determinar la RFC (retest).

1.2.1. Test incremental máximo

La prueba incremental máxima se realizó en un cicloergómetro (SRM, Jülich, Alemania) hasta la imposibilidad del sujeto de mantener la cadencia a 70rpm a pesar de los estímulos verbales de los investigadores. Se les indicó a los sujetos que no realizaran ningún ejercicio en las 48 horas previas a la realización de la prueba además de no ingerir alcohol y/o cafeína el mismo día y asistir en condiciones de ayuno ($\geq 2,5h$ antes). Antes de comenzar el test, los sujetos fueron pesados y su altura medida.

Durante la prueba incremental máxima, se controló la cadencia, la potencia de pedaleo y los MET consumidos con el cicloergómetro (Jette, Sidney, & Blümchen, 1990), además de la FC, mediante un monitor de frecuencia cardíaca (RS800CX, Polar Electro, Kempele, Finlandia) y la concentración de lactato en sangre (Lac^-) mediante un sistema electroquímico (Biosen 5140, EKF-Diagnostic, Dinamarca). En la fase de cinco minutos de

reposo anterior a dicha prueba, se midieron los valores basales de la FC y Lac⁻, para determinar la intensidad del umbral láctico (1mMol > Lac⁻ basal) (Thomas, Costes, Chatagnon, Pouilly, & Busso, 2008). Se utilizó este método por su estandarización en cuanto a la muestra.

Después de informar al sujeto de las particularidades del protocolo de ejercicio, se realizó la instrumentación del este mediante la instalación de una banda en el pecho para registrar la actividad cardíaca y su colocación en el cicloergómetro de acuerdo a su altura.

Tras un periodo de calentamiento de 3 minutos pedaleando a 80W, los sujetos descansaron otros 3 minutos. El inicio de la prueba incremental se dio a la intensidad correspondiente a 2 MET, con incrementos de 2 MET cada 3 minutos hasta la extenuación. Tras esta, se realizó una recuperación activa de 5 minutos a 50W, y se hicieron mediciones de Lac⁻ en cada una de las distintas intensidades, por punción en el lóbulo de la oreja derecha, realizada por personal sanitario.

1.2.2. Test de Recuperación de Frecuencia Cardíaca

Atendiendo a las motivaciones y los objetivos de este estudio se diseñó un protocolo para evaluar la RFC tras dos intensidades

submáximas. Los sujetos acudieron al laboratorio en las mismas condiciones que en el test anterior, es decir, en ayunas, sin ingesta de cafeína y/o alcohol y sin ejercitarse las 48h anteriores. Tras ser pesados (sin camiseta ni zapatillas), se les informó del protocolo de ejercicio y realizaron el test RFC, que consistía en estar 6 minutos pedaleando a la intensidad equivalente al 65% de su FC_{max} (Tanaka et ál., 2001), tras lo cual reposaban durante 3 minutos sentados en el cicloergómetro con las manos en el manillar. Después de estos 3 minutos, volvían a pedalear durante otros 6 a una intensidad del 80% de su FC_{max} y, de nuevo, reposaban durante otros 3 minutos en la misma posición. Los 3 primeros minutos de ambas fases de pedaleo fueron dados para alcanzar la intensidad demandada de forma progresiva; así mismo, las intensidades se determinaron para obtener dos momentos de activación metabólica diferentes con una misma activación de los nervios cardíacos (modelo Rosenblueth-Simeone (Ribeiro, Ibáñez, & Stein, 1991). Finalmente, se registró la FC durante toda la prueba mediante un monitor de FC y el Lac cada tres minutos mediante punción en el lóbulo de la oreja.

1.3. Reducción de datos

Los datos de FC se obtuvieron latido a latido (R-R). Tras acotar los segmentos que se iban a utilizar, se mediaron a cinco segundos. Después se utilizaron los métodos para la evaluación

de la RFC descritos en el último de los apartados de la introducción (páginas 94-98): RFC cinética, T30 y T30_{min} y RFC absoluta, además de una variable adaptada de T30: T30₁₀₋₄₀, la cual se calcula del mismo modo que T30, esto es, tomando los valores desde el segundo 10 al 40 de recuperación. Además, se calcularon los parámetros noveles propuestos en esta tesis: $aucHR_{60}$, $aucHR_{120}$ y $aucHR_{180}$.

El índice de masa corporal (IMC) se determinó mediante la fórmula (Jensen et ál., 2016):

$$IMC = \text{Peso (Kg)} / \text{Altura (m}^2\text{)}$$

1.4. Análisis estadístico

La normalidad de las distribuciones de las variables continuas se analizó mediante el test Shapiro-Wilk. Por su parte, las diferencias entre los test (test RFC) y/o la intensidad de ejercicio (65%FC_{max}, 80%FC_{max}) se evaluaron mediante un test-t por pares. Se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para hallar la covarianza entre intensidades. Para evaluar el nivel de confianza, se calculó el coeficiente de correlación intraclase (ICC) además del error típico y su porcentaje (SEM, SEM%). El nivel alfa se situó en 0.05, por tanto los resultados se consideraron estadísticamente significativos cuyo $p < 0.05$. Los

análisis estadísticos se realizaron mediante el programa estadístico SPSS versión 21 (IBM Corporation, Armonk, NY, EEUU).

2. FASE EXPERIMENTAL 2

2.1. Muestra

Veinte sujetos adultos sanos participaron voluntariamente en esta fase experimental, de los cuales diez eran varones y diez mujeres. Los sujetos fueron reclutados mediante anuncios escritos situados en la facultad de Ciències de la Activitat Física i l'Esport de la Universitat de València.

Previamente a la inclusión en esta fase experimental, todos los participantes fueron informados del propósito, los protocolos y procedimientos que se iban a llevar a cabo. Los sujetos que dieron su consentimiento por escrito fueron finalmente incluidos en la fase experimental.

Este experimento cumple con los principios éticos para la investigación médica en seres humanos establecidos en la Declaración de Helsinki de la Asamblea Médica Mundial y fue aprobado por el Comité Ético de la Universitat de València.

2.1.1. Criterios de inclusión

Por lo que se refiere a los criterios de inclusión y exclusión, se tomó como premisa que los participantes fueran sujetos sanos entre 20 y 30 años para ser incluidos en la fase experimental.

2.1.2. Criterios de exclusión

Los sujetos fueron excluidos de esta fase experimental en caso de cumplir alguno de los criterios detallados en la tabla 5.

Tabla 5. Criterios de exclusión en la fase experimental 2

Anomalías en el ECG en reposo y/o ejercicio
Uso de fármacos cronotrópicos
Obesidad (IMC > 30 kg/m ²)
Uso de tabaco (>1 cigarrillo al día)
Presión arterial sistólica > 140 mmHg
Presión arterial diastólica >90 mmHg

2.2. Protocolo de ejercicio

En el primer test, se realizó una prueba incremental máxima en cicloergómetro para determinar las capacidades cardio-respiratorias de los sujetos. Después, estos efectuaron tres veces la misma prueba submáxima para determinar la RFC y así delimitar el efecto del entrenamiento/desentrenamiento (figura 16).

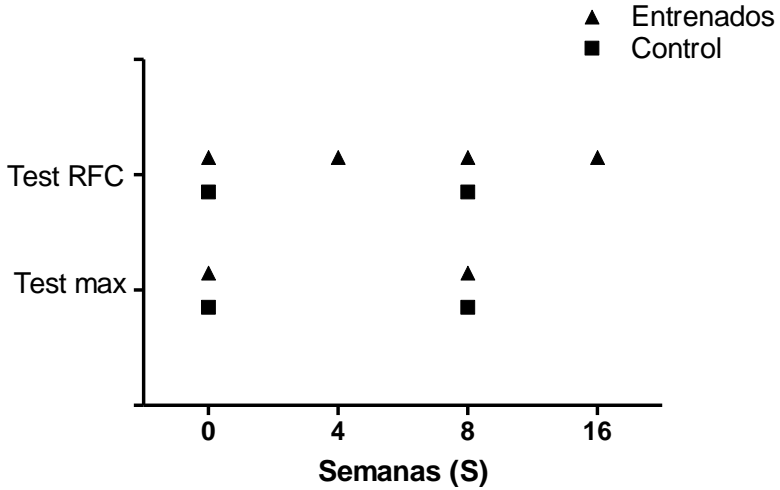


Figura 16. Periodización de las medidas diseñadas para la fase experimental 2

2.2.1. Test incremental máximo

La prueba incremental máxima se realizó en un cicloergómetro (SRM, Jülich, Alemania), hasta la extenuación, para determinar su consumo máximo de oxígeno (VO_{2max}) en las semanas (S) 0 y 8 del experimento. Se les indicó a los sujetos que no realizaran ningún ejercicio en las 24 horas previas a la realización de la prueba, además de no ingerir alcohol y/o caféina el mismo día y asistir en condiciones de ayuno ($\geq 2.5h$ antes). Antes de comenzar el test, los sujetos fueron pesados y se midieron su altura y sus composiciones corporales (BC-418 Body Composition Analyzer, TANITA Corp., Tokyo, Japón).

Tanto antes como después de la prueba incremental máxima se controlaron y registraron los diferentes aspectos/parámetros que se relacionan a continuación. Durante el desarrollo de la prueba incremental máxima, se controló la cadencia, la potencia de pedaleo y los MET consumidos con el cicloergómetro, además de la actividad cardíaca a través de un ECG 12-lead, y la FC, mediante un monitor de frecuencia cardíaca (RS800CX, Polar Electro, Kempele, Finlandia). Por otro lado, los parámetros ventilatorios se registraron con una máscara facial (Hans Rudolph Inc., Kansas City, EEUU) y un analizador de gases (Oxycon, Jaeger, Alemania), el cual fue calibrado antes de las pruebas según indica el fabricante. También se midió la presión arterial inmediatamente después del cese de ejercicio, y tras uno y tres minutos (del cese) por auscultación. Por último, la concentración de lactato en sangre (Lac⁻) se registró mediante un sistema electroquímico portátil (Lactate Pro LT-170, Arkray KDK, Japón).

Anteriormente a la prueba, se realizó un calentamiento de tres minutos a 80W, seguido de otros tres minutos de descanso tras los cuales comenzaba la prueba incremental a la intensidad correspondiente a 2MET. Los incrementos fueron de 2MET cada tres minutos hasta llegar a la extenuación, que se determinó por la incapacidad de poder seguir pedaleando a 70rpm a pesar de los estímulos verbales de los investigadores. El

test fue considerado máximo si se cumplían al menos dos de estas condiciones: Lac^- posejercicio $>8\text{Mmol/L}$; ratio de intercambio respiratorio >1.2 ; $FC_{\text{max}} > FC_{\text{max}}$ predicha.

2.2.2. Test de Recuperación de Frecuencia Cardíaca

En este test se determina la intensidad por cálculo indirecto de la FC_{max} , proceso que evita inversiones de tiempo innecesarias para fijar las intensidades de trabajo. Además, la expresión de intensidades por $\%FC_{\text{max}}$ es muy valiosa para los estudios longitudinales, por la utilización de cargas internas. Este test se realizó en S0, S4, S8 y S16 en el grupo de entrenados y en S0 y S8 para el grupo control. Hay que destacar, finalmente, que durante toda la prueba se registró la FC mediante un monitor de frecuencia cardíaca (S810, Polar Electro, Kempele, Finlandia).

Los sujetos acudieron al laboratorio en las mismas condiciones que en el test anterior, es decir, en ayunas, sin ingesta de cafeína y/o alcohol y sin ejercitarse las 24h anteriores.

Tras ser pesados (sin camiseta ni zapatillas), se les informó del protocolo de ejercicio, y pasaron a realizar el test RFC, que consistía en seis minutos pedaleando a la intensidad equivalente al 65% de su FC_{max} (Tanaka et ál), tras lo cual

reposaban durante tres minutos sentados en el cicloergómetro (Monark, Varberg, Suecia) con las manos en el manillar. Tras este tiempo, volvían a pedalear durante otros seis minutos a una intensidad del 80% de su FC_{max} y volvían a reposar durante otros 3 minutos en la misma posición. Los tres primeros minutos de ambas fases de pedaleo fueron dados para alcanzar la intensidad demandada de forma progresiva.

2.3. Protocolo de entrenamiento

A los sujetos se les asignó de manera aleatoria a uno de los dos grupos: bien el de entrenados, bien el de control. Por lo que respecta al grupo de entrenados, este realizó durante ocho semanas, tres sesiones semanales de 1 hora de duración, cuya intensidad de comienzo fue del 65% de su FC_{max} , y con un aumento progresivo de este ($2,15\%FC_{max}/semana$) hasta el $80\%FC_{max}$ en la última semana de entrenamiento. Se determinaron cargas de entrenamiento submáximas con el objetivo de ser consecuentes con el propósito del test: ser accesible a la población general.

En cuanto a los sujetos incluidos en el grupo control continuaron durante este periodo con sus hábitos regulares.

2.4. Reducción de datos

Los datos de FC se obtuvieron latido a latido (R-R). Tras acotar los segmentos que iban a utilizar, se mediaron a cinco segundos. Después se utilizaron los métodos para la evaluación de la RFC descritos en el apartado **1.3. Reducción de datos** de la fase experimental 1: RFC cinética, T30 y T30_{min} y RFC absoluta, además de una variable adaptada de T30: T30₁₀₋₄₀, la cual se calcula del mismo modo que T30, esto es, tomando los valores desde el segundo 10 al 40 de recuperación.

2.5. Análisis estadístico

Se utilizaron diferentes test y análisis para evaluar los parámetros, puntos que se citan a continuación, que fueron realizados mediante el programa estadístico SPSS versión 21 (IBM Corporation, Armonk, NY, EE. UU.). Para empezar, la normalidad de las distribuciones de las variables continuas se analizó mediante el test Shapiro-Wilk. Seguidamente, la homogeneidad de la muestra fue analizada mediante el test de Levent. Para hallar las diferencias entre los dos grupos con respecto a la RFC y la prueba incremental a la línea base y después del entrenamiento, los dos grupos fueron analizados separadamente en S0 y S8 utilizando un test-t de muestras no pareadas. Además, se utilizó un test-t de muestras pareadas para

analizar la evolución de las variables de S0 a S8. A continuación, los efectos de los periodos de entrenamiento y desentrenamiento en variables de RFC en el grupo de entrenados fueron analizados por análisis de la varianza (ANOVA) con medidas repetidas (S0, S4, S8 y S16). Para identificar las diferencias en parámetros de RFC en cada punto de medida entre la intensidad de ejercicio ($65\%FC_{\max}$; $80\%FC_{\max}$), se utilizó una ANOVA de medidas repetidas, y por último se utilizó el test de Bonferroni para las comparaciones *post hoc*. Las diferencias se consideraron estadísticamente significativas cuyo $p < 0.05$.

2.6. Propuesta de parámetros noveles

Para el cálculo de los parámetros propuestos en este trabajo, y anteriormente introducidos, cabe describir los criterios que se siguieron para su cálculo. En cuanto al apartado de reducción de datos, la señal de la FC en la fase de recuperación se interpoló a 0,01 segundos, ya que al calcular el AUC de modo diferencial es conveniente hallar tantos puntos como sea posible. Tras este proceso se calcularon las variables $HR_{\text{auc}(60,120\text{y}180)}$ tal y como se describe en el último apartado de la Introducción (páginas 94-98).

RESULTADOS

A continuación presentamos los resultados referentes a cada una de las fases experimentales con respecto a los objetivos propuestos.

RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL 1

En este experimento participaron 21 sujetos (17 hombres, 4 mujeres) los cuales tenían una edad de 25.9 ± 4.9 años, un peso de 79.4 ± 13.2 kg y un BMI de $23.0 \pm$ kg/m².

Se determinó el umbral láctico (UL) y se midió la concentración de ácido láctico [Lac⁻] al final de cada intensidad de ejercicio al realizar el protocolo propuesto (65 y 80% de la FC_{max} teórica), con la intención de determinar que el UL se encontraba en un punto intermedio a ambas intensidades.

El umbral láctico (UL) se dio a 1.46 ± 0.55 W/kg en los sujetos sedentarios (n=12) y a 3.00 ± 0.63 W/kg en los activos (n=9). La fase de ejercicio realizada al 65%FC_{max} fue ejecutada por todos los sujetos por debajo del UL. En cambio la fase al 80%FC_{max} se ejecutó a la intensidad correspondiente al UL o mayor.

La correlación entre la FC_{\max} calculada (Tanaka et ál., 2001) y la que se dio en las pruebas incrementales fue estadísticamente significativa (187.2 ± 4.1 y 187.8 ± 5.6 lpm, respectivamente; $p=0.77$). Del mismo modo, los ejercicios realizados al 65 y 80% de FC_{\max} teórica correspondieron a 121.4 ± 2.9 y 150.2 ± 3.7 lpm respectivamente, lo que equivale al $64.6 \pm 2.1\%$ y $80.2 \pm 1.9\%$ de la FC_{\max} real. Asimismo, se midió la RFC después de realizar sendos ejercicios al 65 y 80% de la FC_{\max} teórica, y se les aplicó un test-t por pares con los datos obtenidos en los test (retest) a ambas intensidades (65 y 80% FC_{\max}), además de la prueba de Pearson. También se determinó la repetitibilidad del protocolo mediante el ICC, SEM y %SEM entre ambos test e intensidades.

Muchas de las variables calculadas dieron resultados estadísticamente diferentes entre las dos intensidades submáximas (tabla 6) en los test-t. No es el caso de T30 ($p=0.23$), ΔHRR_{60} ($p=0.78$) y A_0 ($p=0.08$).

En cuanto a la correlación, observamos que existe un alto grado de correlación entre las dos intensidades de ejercicio, que sugiere la proporcionalidad entre los valores calculados en ambas intensidades. No se dio este fenómeno con T30, lo cual es indicador de una gran dispersión de datos.

Tabla 6. Resultados de diferencia y correlación entre las dos intensidades para los parámetros de RFC

Tipo análisis	65%FC _{max}	80%FC _{max}	65%vs.80%FC _{max}	
Parámetro	Media±SD	Media±SD	Diferencia (P)	Correlación(r)
<i>Cinéticos</i>				
A ₀	79,5±11,9	87,1±14	0.076	0.86
A _{max}	41,9±12,8	63,1±15,3	<0.001	0.84
T180	33,6±11,6	63,4±31,5	<0.001	0.74
<i>Recuperación rápida</i>				
T30	192,1±162,2	271,4±250,7	0.231	0.18
T30 _{min}	117,8±38,2	161,5±60,5	0.008	0.67
<i>RFC</i>				
ΔHRR ₆₀	31,6±11,6	32,6±11,1	0.778	0.81
ΔHRR ₁₂₀	34,9±12,3	46,9±13	0.004	0.85
ΔHRR ₁₈₀	34,5±11,8	50±12,4	<0.001	0.91

Algunos de los parámetros para examinar la RFC aumentaron la diferencia estadística entre el primer test y el segundo cuando el ejercicio se realizó al 65%FC_{max} (tabla 7), mientras que los resultados obtenidos después de ejercitarse al 80%FC_{max} fueron más consistentes (tabla 8). No se encontraron diferencias significativas entre los dos test para las mismas medidas.

Tabla 7. Resultados de consistencia relativa y absoluta para los parámetros de RFC tras ejercitarse al 65%FC_{max}

Tipo análisis	65%FC _{max}						
	Prueba1	Prueba2	Prueba1 vs. Prueba2				
Parámetro	Media±SD	Media±SD	P	r	ICC	SEM	%SEM
<i>Cinéticos</i>							
A₀	76,4±11,0	82,7±14,5	0.134	0.74	0.645	16.2	20.3
A_{max}	42,5±13,0	41,2±14,0	0.762	0.78	0.781	12.7	30.3
T180	29,2±9,4	38,0±15,2	0.034	0.78	0.568	18.5	55.1
<i>Recuperación rápida</i>							
T30	136,2±57,3	1862±119,0	0.099	0.67	0.560	145.3	90.1
T30_{min}	104,0±33,0	128,3±51,2	0.074	0.65	0.617	64.0	55.1
<i>RFC</i>							
ΔHRR₆₀	30,9±10,7	32,4±13,6	0.690	0.83	0.808	10.7	34.0
ΔHRR₁₂₀	32,6±11,7	36,3±14,0	0.365	0.74	0.675	14.2	41.3
ΔHRR₁₈₀	31,5±9,7	37,5±14,8	0.125	0.83	0.690	14.7	42.7

Tras ejercitarse al 65%FC_{max} la consistencia relativa (ICC) fue ≥ 0.645 para todos los parámetros calculados en el periodo $\geq 60s$, a excepción de T180. Para los parámetros estudiados en un periodo más corto (T30 y T30_{min}) se encontró un ICC menor

(≤ 0.617). La consistencia absoluta (%SEM) mostró una tendencia inversa a la longitud de tiempo.

Tabla 8. Resultados de consistencia relativa y absoluta para los parámetros de la RFC tras ejercitarse al 80%FC_{max}

Tipo análisis	80%FC _{max}						
	Prueba1	Prueba2	Prueba1 vs. Prueba2				
Parámetro	Media±SD	Media±SD	P	r	ICC	SEM	%SEM
<i>Cinéticos</i>							
A₀	84,4±15,0	90,8±14,1	0.163	0.83	0.763	14.9	17.3
A_{max}	63,9±17,5	61,6±13,9	0.635	0.82	0.795	14.4	23.0
T180	58,8±32,1	68,1±35,2	0.388	0.75	0.758	35.7	56.2
<i>Recuperación rápida</i>							
T30	224,1±133,0	217,4±84,2	0.851	0.59	0.545	149.5	67.7
T30_{min}	152,8±64,2	170,2±63,8	0.385	0.79	0.767	62.9	39.0
<i>RFC</i>							
ΔHRR₆₀	30,0±12,1	35,2±10,8	0.148	0.86	0.778	11.4	34.9
ΔHRR₁₂₀	43,6±14,2	50,2±12,8	0.121	0.85	0.762	14.0	29.7
ΔHRR₁₈₀	46,2±13,3	53,9±12,3	0.060	0.87	0.738	14.3	28.6

Tras ejercitarse al 80%FC_{max}, ICC fue ≥ 0.738 para todos los parámetros calculados en un periodo ≥ 60 s. El estudio de los parámetros más cortos (< 60 s) mostró que T30_{min} tuvo un mayor ICC que T30 (0.767 vs. 0.535). Tal y como ocurre tras ejercitarse al 65%FC_{max}, al hacerlo al 80%FC_{max}, %SEM muestra una tendencia inversa a la longitud de la recuperación. Por comparación del nivel de confianza dado a ambas intensidades,

observamos que los ratios de ICC fueron mayores y %SEM menores al 80% que 65% FC_{max} .

RESULTADOS DE LA FASE EXPERIMENTAL 2

En este experimento participaron 20 sujetos (10 hombres y 10 mujeres), los cuales se dividieron aleatoriamente en dos grupos: control ($n=10$; edad= 32.30 ± 7.7 ; peso= 68.87 ± 13.66 ; BMI= 23.66 ± 2.47) y entrenados ($n=10$; edad= 29.70 ± 6.31 ; peso= 67.56 ± 11.30 ; BMI= 23.23 ± 2.71).

Para hallar las diferencias entre los dos grupos con respecto a la RFC y la prueba incremental, se realizó un test-t de muestras no pareadas, y además, un test-t de muestras pareadas para analizar la evolución de las variables de la semana 0 a la 8. Los efectos de los periodos de entrenamiento y desentrenamiento fueron analizados por análisis de la varianza (ANOVA) con medidas repetidas para cada uno de los grupos (semanas 0, 4, 8 y 16). Para identificar las diferencias entre las intensidades de ejercicio ($65\%FC_{max}$; $80\%FC_{max}$) se utilizó una ANOVA de medidas repetidas. El grado de significación (p) se aceptó como positivo al ser <0.05 .

La tabla 9 muestra las características de los sujetos antes de empezar el estudio. El consumo máximo de oxígeno no mostró diferencias ($p\geq 0.292$) entre los sujetos de ambos grupos.

Tabla 9. Variables descriptivas de la muestra por grupos, representadas por Media \pm SD.

	Grupo entrenados (n=10)	Grupo Control (n=10)
Hombres/Mujeres	5/5	5/5
Edad(años)	29.70 \pm 6.31	32.30 \pm 5.71
Peso (kg)	67.56 \pm 11.30	69.87 \pm 13.66
BMI (kg/m ²)	23.23 \pm 2.71	23.66 \pm 2.47
VO _{2max} (ml/min/kg)	35.64 \pm 6.15	33.20 \pm 3.47

La tabla 10 muestra los parámetros de RFC para todos los sujetos en la semana 0. Cabe señalar que ningún parámetro mostró diferencias significativas entre los sujetos de los dos grupos, y que en el periodo de tiempo entre las semanas 0 y 8 no se dio ningún cambio significativo en los parámetros de RFC calculados ($p \geq 0.069$) o en consumo máximo de oxígeno ($VO_{2max}[S0]=33.20 \pm 3.47$) ml/min/kg, $VO_{2max}[S8]=34.10 \pm 4.14$ ml/min/kg, $p=0.314$) entre los sujetos del grupo control.

Tabla 10. Diferencia para RFC después de ambas intensidades en la semana 0 y entre grupos

		Grupo Entrenado (n=10)	Grupo Control (n=10)	P
ΔHR_{60} (lpm)	65%	21.44±6.73	23.68±4.90	0.405
	80%	29.32±10.00	27.59±7.13	0.661
ΔHR_{120} (lpm)	65%	25.70±7.14	30.40±6.35	0.138
	80%	39.47(±6.37)	39.68±5.01	0.937
ΔHR_{180} (lpm)	65%	28.74±7.46	33.18±6.66	0.177
	80%	43.77±6.31	42.71±5.60	0.697
T30(s)	65%	214.97±80.01	271.70±121.87	0.234
	80%	229.69±85.53	336.56±183.04	0.112
T ₁₀₋₄₀ (s)	65%	239.72±124.68	259.25±121.06	0.726
	80%	248.74±69.73	269.61±131.96	0.664
T30 _{min} (s)	65%	201.47±82.98	198.53±64.80	0.931
	80%	208.09±63.77	235.44±85.73	0.429
A ₀ (lpm)	65%	94.17±8.84	88.26±10.84	0.198
	80%	102.22±11.46	103.39±5.87	0.777
A _{max} (lpm)	65%	32.15±11.12	40.62±7.57	0.074
	80%	49.42±15.34	58.12±5.36	0.119
T ₁₈₀ (s)	65%	42.30±24.26	46.97±10.97	0.651
	80%	68.38±34.74	55.68±20.22	0.331

En cuanto a la figura 17, esta muestra el efecto del entrenamiento y desentrenamiento en ΔHR_{60} a 65% ($p < 0.001$) y 80% ($p = 0.008$). Las comparaciones post hoc (Bonferroni) mostraron un aumento significativo en ΔHR_{60} en ambas intensidades ($p < 0.01$) al comparar las S0 y S8. En la S16, los valores de ΔHR_{60} volvieron cerca de los niveles de la S0, siendo significativamente menores que en la S8 ($p < 0.01$).

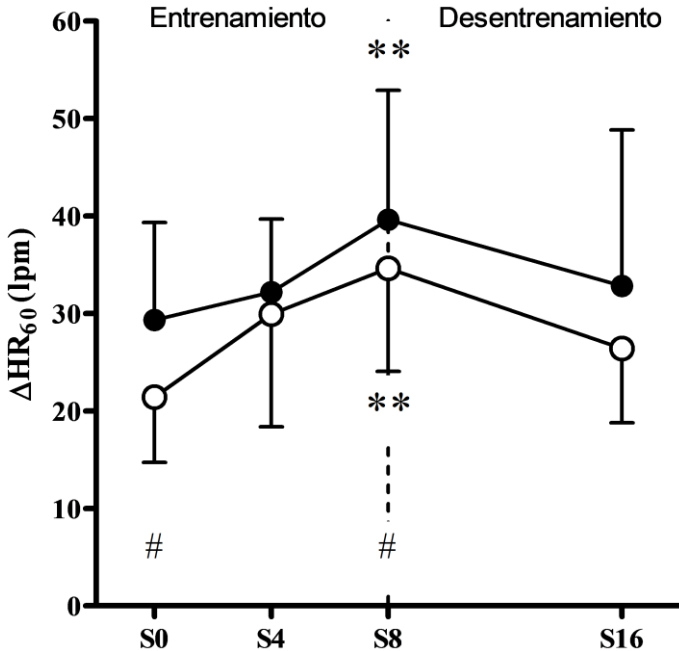


Figura 17. Evolución de las variables de RFC con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . ΔHR_{60} están representadas en lpm. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ vs. S0. # $p < 0.05$, ## $p < 0.01$, ### $p < 0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

ΔHR_{120} tuvo un comportamiento similar (figura 18) con un efecto estadísticamente significativo tanto del entrenamiento como del desentrenamiento en 65% ($p = 0.010$) y 80% ($p = 0.011$) y un incremento en S8 comparado con S0 ($p < 0.01$).

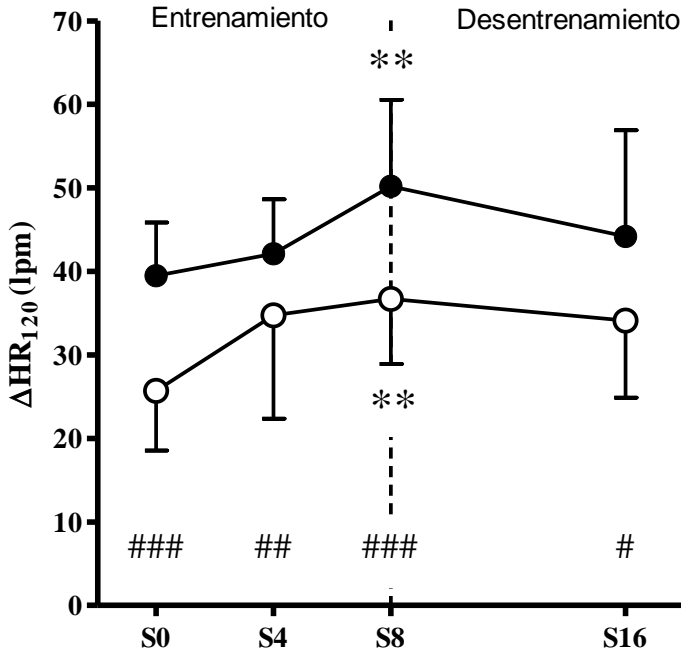


Figura 18. Evolución de las variables de RFC con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max}. ΔHR₁₂₀ está representada en lpm. Las barras de error representan la desviación estándar. *p<0.05, **p<0.01, ***p<0.001 vs. S0. #p<0.05, ##p<0.01, ###p<0.001 65% vs. 80%FC_{max} en la misma semana

La evolución de ΔHR₁₈₀ con el entrenamiento/desentrenamiento está representada en la figura 19. En ambas intensidades se observó un efecto mayor de la muestra de tiempo (p=0.001 para 65%; p<0.001 para 80%). ΔHR₁₈₀ después del ejercicio al 80% mostró un aumento

significativo mayor ($p<0.001$) que al 65% ($p<0.01$) en la S8 comparada con S0.

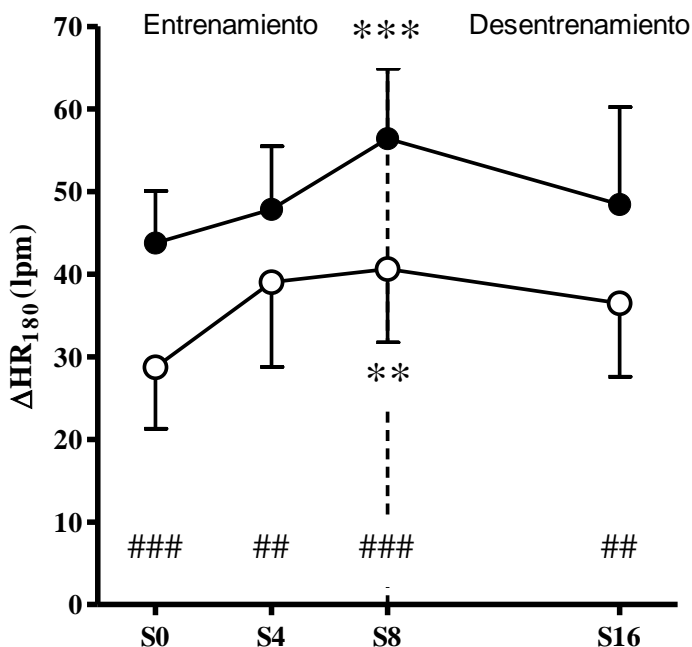


Figura 19. Evolución de las variables de RFC con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . ΔHR_{180} está representada en lpm. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

La figura 20 muestra la evolución de T_{30} , T_{10-40} y $T_{30_{min}}$ respectivamente. Al 65%, T_{30} presentó un efecto mayormente significativo ($p=0.003$) pero tras las comparaciones *post hoc* mediante el ajuste de Bonferroni no se encontró ninguna

diferencia entre cualquier muestra de tiempo ($p \geq 0.052$). Esta variable al 80% no fue sensible al entrenamiento ni desentrenamiento, y mostró la ausencia de diferencias significativas por lo que al efecto mayor se refiere ($p=0.088$).

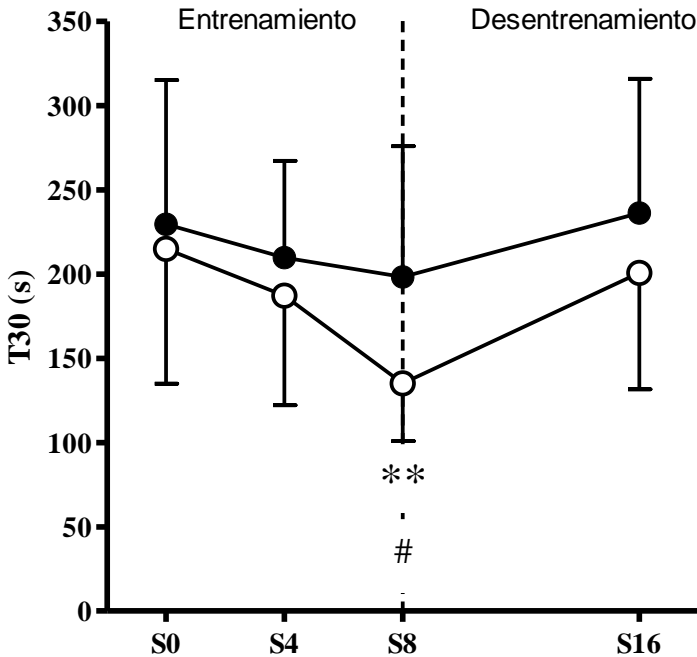


Figura 20. Evolución de la variable de RFC T30 con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . T30 se representan en s. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ vs. S0. # $p < 0.05$, ## $p < 0.01$, ### $p < 0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

En la figura 21 se muestran los resultados de T_{10-40} al 65% ($p=0.025$), que mostró un efecto mayormente significativo

pero las comparaciones post hoc no encontraron ninguna diferencia entre cualquier muestra de tiempo ($p \geq 0.052$). Esta variable al 80% tampoco fue sensible al entrenamiento ni desentrenamiento, y no mostró diferencias significativas ($p = 0.086$).

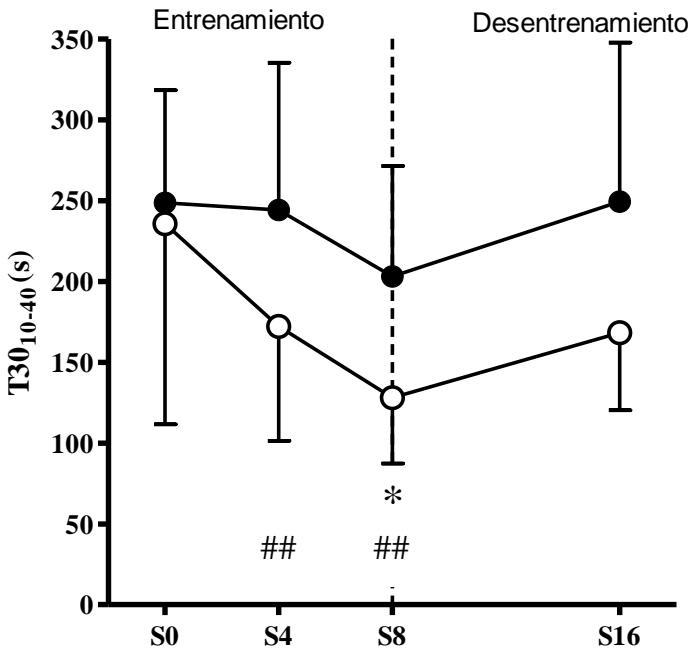


Figura 21. Evolución de la variable de RFC T3010-40 con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . T3010-40 se representa en s. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ vs. S0. # $p < 0.05$, ## $p < 0.01$, ### $p < 0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

T30_{min} al 65% (figura 22) presentó un mayor efecto significativo ($p<0.001$) y un aumento también significativo en la S8 comparada con la S0 ($p<0.05$), semana 4 ($p<0.01$) y S8 ($p<0.001$). Al 80% no fue sensible al entrenamiento ni desentrenamiento, ya que no se dieron diferencias significativas en cuanto al efecto mayor ($p=0.073$).

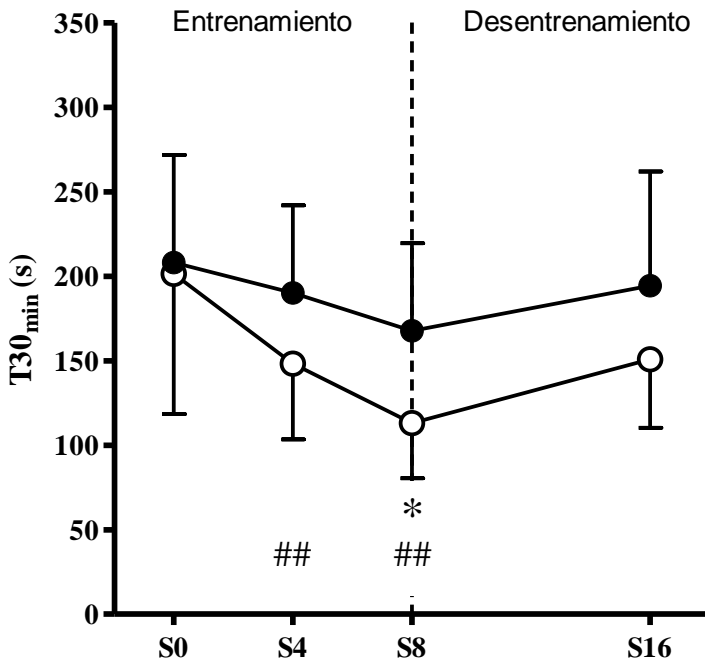


Figura 22. Evolución de la variable de RFC T30min con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max}. T30min se representa en s. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80%FC_{max} en la misma semana

Los parámetros de ajuste a la función mono-exponencial a la curva de descenso de la FC en los primeros tres minutos (A_{max} , A_0 , y T_{180}) al 65% y 80%, se muestran en las figuras 23-25 respectivamente. Para la variable T_{180} , encontramos un efecto no significativo de las fases de entrenamiento y desentrenamiento para ambas intensidades ($p=0.313$ para 65%; $p=0.457$ para 80%).

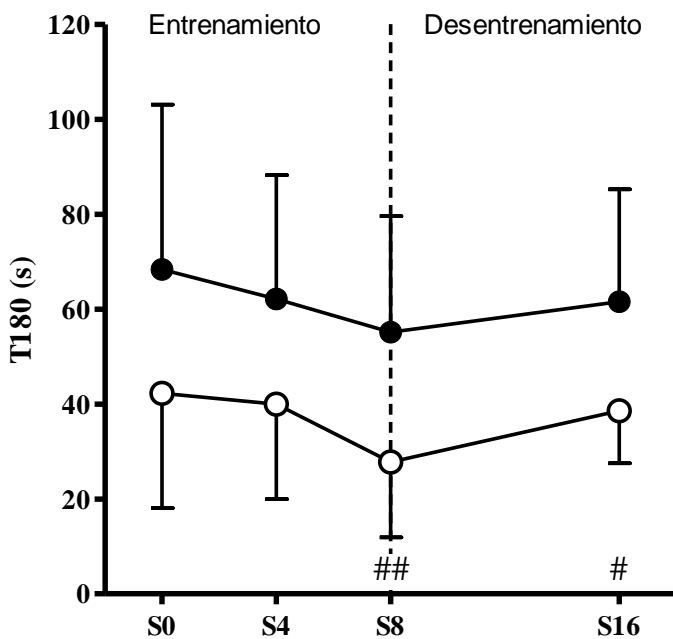


Figura 23. Evolución de la variable de RFC T_{180} con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . T_{180} representa la función monoexponencial descrita por la RFC. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

A_{max} mostró un efecto mayor significativo al 80% ($p=0.009$) y al 65% ($p=0.004$), pero a esta intensidad no hubieron diferencias significativas en las comparaciones *post hoc*. Al 80%, A_{max} se incrementó significativamente en la S8 comparada con la S0 ($p<0.05$) y la 4 ($p<0.05$).

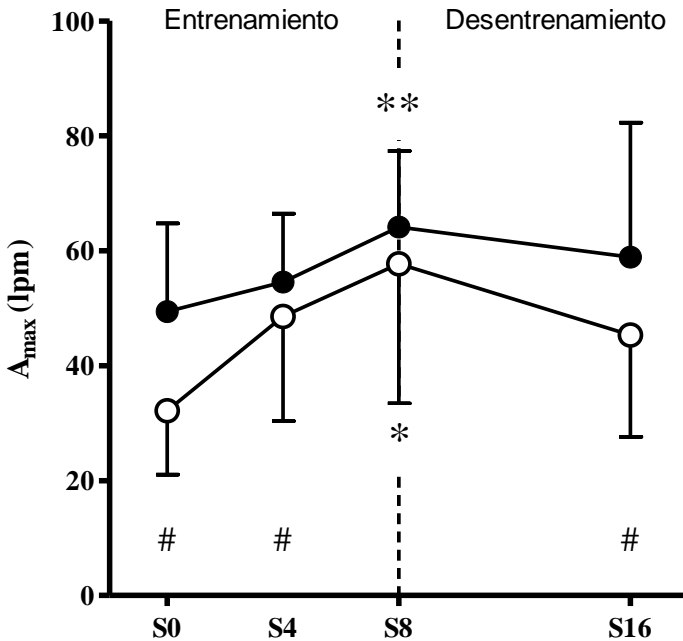


Figura 24. Evolución de la variable de RFC A_{max} con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . A_{max} representa la función monoexponencial descrita por la RFC. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

A_0 mostró un efecto mayor significativo al 65% ($p=0.010$) y al 80% ($p=0.043$). Para A_0 al 65%, las comparaciones *post hoc* mostraron un aumento en la S8 comparada con la S0 ($p<0.01$), mientras que al 80% no se encontraron diferencias significativas entre S0, S4, S8 y S16 ($p\geq 0.053$).

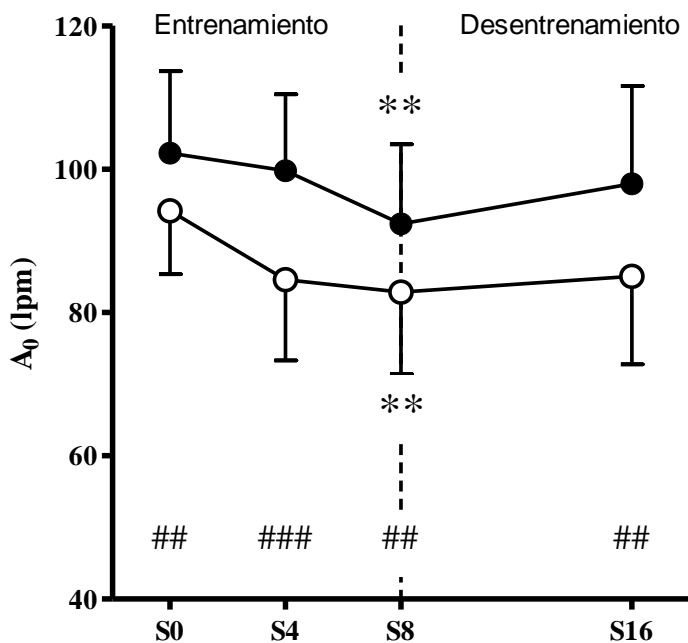


Figura 25. Evolución de la variable de RFC A_0 con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . A_0 representa la función monoexponencial descrita por la RFC. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

1. RESULTADOS DE PARÁMETROS NOVELES PROPUESTOS

En las figuras 26-28, se representan los resultados de la ANOVA de medidas repetidas para las variables de RFC determinadas por el área a los 60, 120 y 180 segundos de recuperación respectivamente ($_{aucHR60}$, $_{aucHR120}$ y $_{aucHR180}$). En la figura 24 podemos observar cómo existen diferencias significativas para $_{aucHR60}$ entre la S0 y S8 tras ejercitarse al 65% FC_{max} ($p=0.00$). $_{aucHR60}$ también muestra diferencias significativas entre las S8 y S16 al 80% FC_{max} ($p=0.00$), y aunque no de manera significativa se observa un efecto mayor entre S0 y S8 a esta misma intensidad ($p=0.05$). En cuanto a las diferencias entre intensidades, se muestran diferencias no significativas en ninguna de las cuatro medidas, aunque sí se hace patente un efecto mayor en la S8 ($p=0.08$). Cabe destacar la disparidad en los resultados en algunas de las mediciones, tal y como indican las altas desviaciones estándar.

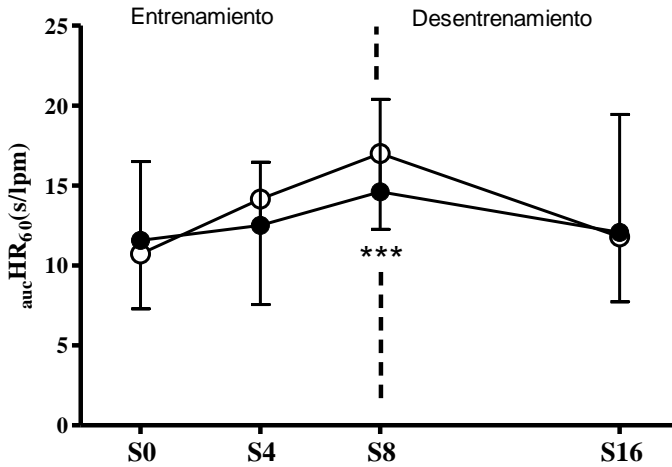


Figura 26. Evolución de la variable de RFC $aucHR_{60}$ con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . $aucHR_{60}$ representa el área entre lpm/tiempo descrita por la RFC en el primer minuto. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$ vs. S0. # $p < 0.05$, ## $p < 0.01$, ### $p < 0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

Los resultados para $_{auc}HR_{120}$ se presentan en la figura 25, en la que no existen diferencias significativas entre ambas intensidades en ninguna de las mediciones. En cuanto a las diferencias entre las comparaciones longitudinales, al 65% se dieron diferencias significativas entre S0 y S8 ($p=0.00$) y entre S8 y S16 ($p=0.01$). Para el 80%, también se hallaron diferencias significativas entre S0 y S8 ($p=0.00$) y entre S8 y S16 ($p=0.04$).

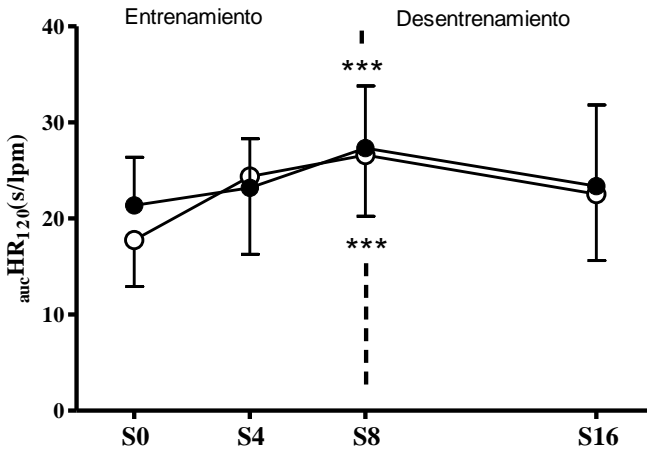


Figura 27. Evolución de la variable de RFC $_{auc}HR_{120}$ con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . $_{auc}HR_{120}$ representa el área entre lpm/tiempo descrita por la RFC hasta el segundo minuto. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

Los resultados para $_{auc}HR_{180}$ los podemos observar en la figura 26. Aquí se dan diferencias significativas entre S0 y S8

tanto en la recuperación tras ejercitarse al 65% FC_{max} como al 80% FC_{max} ($p=0.00$ para ambas); Además se dan diferencias significativas al 80% FC_{max} entre las S8 y S16 ($p=0.03$); asimismo, a esta intensidad se observa un efecto aunque con diferencias no significativas entre S8 y S4 ($p=0.06$). También existen diferencias significativas entre ambas intensidades en S0 ($p=0.02$).

Cabe destacar que en todas las variables calculadas por AUC se observa un efecto más marcado de S0 a S8 que entre S8 y S16.

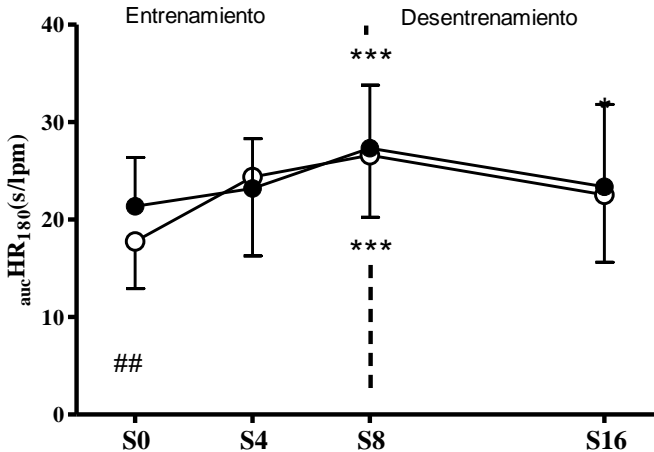


Figura 28. Evolución de la variable de RFC $_{auc}HR_{180}$ con entrenamiento (S0-S8) y desentrenamiento (S8-S16) tras 6 minutos de ejercicio al 65% (○) y al 80% (●) de la FC_{max} . $_{auc}HR_{180}$ representa el área entre lpm/tiempo descrita por la RFC hasta el tercer minuto. Las barras de error representan la desviación estándar. * $p<0.05$, ** $p<0.01$, *** $p<0.001$ vs. S0. # $p<0.05$, ## $p<0.01$, ### $p<0.001$ 65% vs. 80% FC_{max} en la misma semana

El periodo de entrenamiento aumentó el consumo máximo aeróbico en los sujetos pertenecientes al grupo de entrenados ($VO_{2max}[S0]=35.64(6.15)$ ml/min/kg, $VO_{2max}[S8]=42.32(4.64)$ ml/min/kg, $F(1,9)=47.836$, $p<0.001$).

DISCUSIÓN

FASE EXPERIMENTAL 1

Los test de ejercicios submáximos pueden ser una elección preferente para la evaluación de la RFC, por que pueden ser realizados por la mayoría de la población y no precisan de personal especializado. Los ejercicios máximos pueden confundir los resultados de un test: los humanos no siempre alcanzamos intensidades máximas por motivos volitivos, patologías, dolores o dificultades técnicas. La evaluación de cambios en la capacidad física precisa de un método sensitivo; y la sensibilidad depende de su validez (Barak et ál., 2011; Lachin, 2004).

En este estudio se evalúa la validez por ICC y %SEM: se complementan entre ellos, siendo la forma de medida de consistencia relativa y consistencia absoluta (Weir, 2005). El gráfico de Band-Altman permite el cálculo de límites de concordancia del 95%, lo que depende de la magnitud de la medida (Atkinson & Nevill, 1998). A la inversa, ICC, %SEM, y el coeficiente de regresión determinan valores sin unidades, lo que permite una comparación directa entre métodos.

En este estudio se muestra que la elección de la intensidad puede afectar al cálculo de resultados de la RFC, y algunos modelos muestran diferentes valores a distintas intensidades. Otros investigadores encontraron anteriormente

que las diferencias en T180 son independientes de la intensidad de ejercicio (Buchheit, Laursen, & Ahmaidi, 2007; Imai et ál., 1994; Pierpont, Stolpman, & Gornick, 2000).

La intensidad de ejercicio también puede afectar a la validez de las medidas de RFC. La variabilidad biológica de los componentes simpático y vagal en la FC durante la recuperación es el factor más importante tras ejercicios de intensidades más altas (Martinmäki & Rusko, 2008). Se encontró un aumento en la sensibilidad de la medida (mayor ICC sin cambios en SEM) tras la fase de ejercicio al 80% FC_{max} comparándola con la fase al 65% FC_{max} . La consistencia relativa (ICC) fue casi siempre mayor en la intensidad más alta, tal y como señalaban en sus estudios Lamberts y cols (R. P. Lamberts et ál., 2011).

T30_{min} mostró diferencias significativas en las diversas intensidades. Este método de cálculo obtiene resultados más consistentes, probablemente por no verse influido por errores de cálculo debidos a fluctuaciones o artefactos de la FC. No obstante, son necesarias más investigaciones para determinar este método como parámetro de medida de la reactivación vagal.

Además, también encontramos un alto ICC para ΔHRR_{60} tras la fase al 65% FC_{max} . La misma medida parece aportar menores ICC tras ejercicios en tapiz rodante (L Bosquet et ál.,

2008). Estos resultados sugieren que ΔHRR_{60} muestra una mayor exactitud tras ejercicios en cicloergómetro que en tapiz rodante (Yawn, Ammar, Thomas, & Wollan, 2003). A_0 , A_{\max} y ΔHRR también muestran una consistencia absoluta bastante alta, especialmente tras los ejercicios a la intensidad más alta ($80\%FC_{\max}$).

Contrariamente, a otros parámetros, T30 y T180 en ambas intensidades de ejercicio obtuvieron una validez menor. T180 describe el tono fino de la actividad nerviosa cardíaca y el estado metabólico del sujeto (Perini et ál., 1989; Perini, Orizio, Gamba, & Veicsteinas, 1993; Pierpont & Voth, 2004). Posiblemente, esta compleja interacción se acaba de describir más o menos por la función resultante de la caída de FC, y existe una gran variabilidad en la respuesta general. T30, la cual es una medida indirecta de actividad vagal, se determinó anteriormente con validez tras ejercicios submáximos en tapiz rodante (Imai et ál., 1994), en nuestro trabajo la validez hallada fue bastante pobre. Estas diferencias pueden explicarse por el diferente tipo de ejercicio y un punto de vista estadísticamente distinto.

Se eligió una población con una gran variabilidad interindividual, y este factor afecta negativamente a la presunción de validez (Hopkins, 2000). Previamente se sugirió que la actividad parasimpática, medida por T30, es

independiente de la intensidad de ejercicio (Imai et ál., 1994). Mostramos esta falta de diferencias para T30 entre las intensidades de 65 y 80% FC_{max} fueron atribuibles al alto valor de CV% (medida del ratio señal-ruido), la cual enmascara un cambio de ~40% en el valor medio de ambas intensidades. Es razonable asumir que los cambios en la reactivación parasimpática cambian por la variación de intensidades de ejercicio, ya que la activación parasimpática está inhibida proporcionalmente a la activación simpática (Pierpont & Voth, 2004; Taha, Simon, Dempsey, Skatrud, & Iber, 1995; Warner, 1995). Así pues, nuestros resultados cuestionan la validez de T30 para medir la reactivación parasimpática.

Un factor adicional que afecta a la validez es la longitud de la recuperación. Se observan las diferencias en RFC entre las dos intensidades mediante ΔHRR_{120} y ΔHRR_{180} , pero no mediante ΔHRR_{60} , por la diferencia en la rapidez de descenso de FC tras los dos ejercicios. Encontramos que estas medidas de RFC dentro del primer minuto post-ejercicio tienen un alto grado de error. Esta variabilidad puede estar debida en parte a la variabilidad natural de la reactivación parasimpática. Tal y como otros autores observaron con anterioridad (Perini et ál., 1993), sugerimos que una RFC más larga se ve mayormente afectada por las demandas metabólicas. Tras el ejercicio al 80% FC_{max} , la sensibilidad de los modelos aumenta en tiempos de recuperación más largos; otros

investigadores también encontraron un menor %SEM por aumento del tiempo de recuperación (L Bosquet et ál., 2008; Pierpont et ál., 2000). No obstante, a una intensidad interna más baja ($65\%FC_{\max}$) esta relación en parte se pierde, y %SEM fue mayor en menores periodos de recuperación.

FASE EXPERIMENTAL 2

Este estudio muestra que los cambios en la capacidad cardíaca en respuesta al entrenamiento y desentrenamiento pueden ser medidos por un sencillo y novel test submáximo de RFC de 18 minutos de duración. Se han utilizado muchos protocolos de ejercicio para evaluar la RFC en sujetos entrenados y sedentarios (Bangsbo, Iaia, & Krusturup, 2008; L Bosquet et ál., 2008; Buchheit, Chivot, et ál., 2010; Robert P Lamberts, 2013). En particular, el test novel Lamberts Submaximal Cycle Test (LCST) mostró una validez y correlación buenas entre pedaleo y parámetros para RFC tras potencias submáximas (Lamberts et ál., 2011). En este estudio, RFC fue medido solo como la FC absoluta recuperada tras cada una de las intensidades.

El protocolo propuesto para la RFC proporciona una amplia gama de información al determinar la RFC tras dos intensidades distintas. Encontramos que algunos de los parámetros para la RFC cambiaron con ambas intensidades de ejercicio durante los periodos de entrenamiento y desentrenamiento, mientras que otros cambiaron solo en la intensidad de ejercicio más baja. Este es especialmente el caso en todos los cálculos dados en la RFC rápida (<1min), donde las adaptaciones fueron evidentes tan solo después del ejercicio al

65% FC_{max} del test. Este hecho es consistente para tres métodos de cálculo ($T30$, $T30_{10-30}$ y $T30_{min}$), lo que excluye cualquier artefacto causado por un análisis matemático específico. Previamente reportamos que tras 80% HR_{max} , RFC proporciona mediciones más fiables que tras 65% HR_{max} (Arduini, Gomez-Cabrera, & Romagnoli, 2011). Esto es consistente con los hallazgos reportados por otro grupo que analizó la RFC a diferentes intensidades de ejercicio para encontrar que una carga de trabajo de $\sim 90\%FC_{max}$ da mediciones más fiables que en cargas de trabajo más bajas (R. Lamberts, Maskell, Borresen, & Lambert, 2011). Sin embargo, las cargas de trabajo de ejercicios de diferentes intensidades obtienen diversos grados de actividad de los nervios cardíacos; el tono simpático aumenta por encima del 65% FC_{max} , que es concomitante con la retirada del tono parasimpático. Esto también se puede observar en la fase de recuperación. Un ejercicio de mayor intensidad requiere tanto la reactivación vagal como la retirada del tono simpático (Pierpont & Voth, 2004; Pierpont, Adabag, & Yannopoulos, 2013). Es importante señalar que el uso de ejercicios máximos puede limitar la evaluación de la reactivación parasimpática porque el tono parasimpático es roto, o incluso ausente, después de un ejercicio máximo (Oliveira, Alvarenga Mattos, Silva, Rezende, & Lima, 2013). Por lo tanto, mantenemos que las primeras adaptaciones en la reactivación parasimpática pueden estar

mejor desenmascaradas cuando el tono simpático es bajo, lo que pone de relieve la importancia de la selección de ejercicios de baja intensidad para evaluar la reactivación parasimpática.

El test propuesto proporciona información para RFC rápida y prolongada. La fase de recuperación rápida del ejercicio (<1min) se rige principalmente por la reactivación parasimpática, y la retirada del tono simpático contribuye más a partir de entonces. Nuestro análisis muestra un cambio muy significativo en varios parámetros de RFC (RFC absoluta y la decadencia mono-exponencial) medidos ≥ 1 min. Esto pone de manifiesto que la capacidad de respuesta de la actividad tanto simpática y parasimpática se adapta a la práctica de ejercicio aeróbico y afecta a la RFC general.

Los parámetros A_0 y A_{\max} de la función mono-exponencial mejoran mientras que T180 no mostró cambios significativos. Esto es consistente con nuestro estudio anterior, donde encontramos escasa fiabilidad para T180, lo que significa que el efecto de entrenamiento puede ser fácilmente enmascarado por una amplia variabilidad en la propia medición.

PROPUESTA DE PARÁMETROS NOVELES

En cuanto a los resultados para $\text{aucHR}_{(60,120,180)}$ no pueden ser comparados con otros estudios y/o autores, ya que están

planteados por este estudio. Se muestran cambios significativos tras ocho semanas de entrenamiento en estas tres variables al ser calculadas al $65\%FC_{max}$, por lo que muestran una alta sensibilidad a las mejoras en la capacidad física, en contraposición a lo recomendado por otros autores (Buchheit, Papelier, et ál., 2007; Dupuy, 2012; Lambert & Borresen, 2006; R. Lamberts et ál., 2011; R. P. Lamberts et ál., 2010), por lo que se debería estudiar esta sensibilidad en futuros estudios. Ocurre lo mismo tras la fase de desentrenamiento para $aucHR_{60}$ y $aucHR_{120}$. Esta sensibilidad a los cambios en la capacidad física es más elevada cuanto más larga es la recuperación; al calcular dichas variables tras la fase al $80\%FC_{max}$, existen diferencias significativas para $aucHR_{120}$ y $aucHR_{180}$ tras las fases de entrenamiento y desentrenamiento, no siendo así para $aucHR_{60}$. Estos resultados nos podrían indicar que las variables calculadas mediante $aucHR$ son más sensibles a la activación parasimpática, ya que los resultados son más consistentes cuanto más larga es la recuperación y más alta la intensidad del ejercicio (Daanen et ál., 2012). También hay que tener en cuenta que la disparidad entre los sujetos es bastante alta, tal y como muestran las desviaciones estándar, por lo que seremos cautelosos a la hora de sacar conclusiones a cerca de estos parámetros.

Esta nueva prueba de RFC se puede realizar fácilmente con un proceso de aprendizaje mínimo. Se basa en el ejercicio de

intensidad moderada, lo que hace que sea más seguro, evita requisitos especiales, confiere una buena fiabilidad (Arduini et ál., 2011) y produce resultados que son fáciles de analizar. Dadas estas características, será interesante para evaluar su desempeño en otras poblaciones, en las que la patología, el envejecimiento o el deterioro físico pueden limitar o impedir el uso de las pruebas estándar para la evaluación cardíaca y física.

Nuestro estudio muestra que el test propuesto también supervisa primeras adaptaciones del estado físico, y que un análisis combinado de RFC en dos intensidades diferentes de ejercicio (65% y 80% FC_{max}) ofrece más información sobre la salud cardiovascular. Teniendo en cuenta los costos reducidos, el alto nivel de seguridad y la gran utilidad de este protocolo de pruebas, creemos que es una herramienta valiosa para monitorizar los cambios en la salud cardiovascular en la población general.

En resumen, los diversos modelos para el cálculo de la RFC tras ejercitarse en cicloergómetro son válidos para monitorizar la capacidad física en personas sanas. La mayoría de estos modelos son sensibles a los cambios en la intensidad del entrenamiento. Una intensidad interna correspondiente al 80% de la FC_{max} tiene mayor validez que ejercitarse a una intensidad menor (65% FC_{max}). A esta intensidad, la consistencia de los

resultados es mayor debido a que la recuperación es más prolongada. $T_{30\min}$ permite medir el componente rápido de la RFC, mientras que A_{\max} y A_0 son los modelos preferentes para la medición más prolongada de la RFC.

CONCLUSIONES

A continuación, se exponen las conclusiones para cada uno de los objetivos específicos propuestos e hipótesis planteadas.

Objetivo 1. Podemos concluir que existen diferencias metabólicas entre las dos intensidades de ejercicio utilizadas en el test propuesto, habiendo parámetros fisiológicos (UL) relativos a la condición física que los diferencian con claridad en la entera muestra. Además, no existen diferencias entre la FC_{max} teórica (utilizada en este test) y la real, lo cual indica que las intensidades internas de ejercicio mantienen su proporcionalidad.

Objetivo 2. Concluimos que existen diferencias estadísticas consistentes en los parámetros de RFC entre las dos intensidades del test novel propuesto, guardando así la proporcionalidad entre los resultados y la intensidad del ejercicio.

Objetivo 3. Podemos afirmar que existe correlación en los parámetros de RFC entre las dos intensidades submáximas, por lo que se guarda la proporcionalidad de los resultados con la intensidad del ejercicio.

Objetivo 4. Se confirma que la reproducibilidad de los datos tras ejercitarse al $65\%FC_{max}$ es aceptable.

Objetivo 5. La reproducibilidad de los datos para la RFC tras ejercitarse al $80\%FC_{\max}$ resulta más que aceptable.

Objetivo 6. Las variables $_{\text{auc}}HR_{(60,120,180)}$ son concluyentemente sensibles a los cambios en la capacidad física de un modo similar a variables como $\Delta HRR_{(60, 120, 180)}$, aunque de una manera más marcada cuanto más larga es la recuperación.

Objetivo 7. Concluimos que el test novel propuesto es sensible a las adaptaciones mediante un entrenamiento aeróbico.

Objetivo 8. El test novel propuesto resulta sensible a un desentrenamiento de ocho semanas.

LIMITACIONES

Una posible limitación de este estudio es la distribución no aleatoria de ejercicios transversalmente a sujetos. Elegimos realizar los ejercicios de menor a mayor intensidad. No obstante, nuestra elección estuvo motivada por el hecho de evitar un probable traspaso de parámetros fisiológicos (Lac-) debido a un cambio de mayor a menor intensidad de ejercicio.

Otra posible limitación es el uso de FC_{\max} teórica en comparación con FC_{\max} real. Decidimos esta estrategia para hacer el test más adaptable a una mayor porción de la población, evito la realización de un test máximo a los futuros participantes.

En cuanto a los parámetros de RFC propuestos calculados por AUC, se introdujeron en el estudio longitudinal pero no en la primera fase experimental, en la que los resultados hubiesen tenido una mayor consistencia y se hubiesen obtenido conclusiones más firmes.

Creemos que son necesarias más investigaciones que utilicen este test para compararlo y observar cuál es la evolución de los datos por la acción de diferentes efectos, muestras, etc.

APLICACIONES PRÁCTICAS

En este documento mostramos que los parámetros de RFC (ΔHR_{60} , ΔHR_{120} , ΔHR_{180} , T30, T30_{min}, T30₁₀₋₄₀, A₀ y A_{max}) determinados por un sencillo test submáximo pueden ser utilizados para monitorizar la adaptación y desadaptación a un entrenamiento físico. Este test es fácil de realizar y no requiere material costoso. Además, los datos están validados, son fáciles de analizar y proporcionan información de la RFC tras dos intensidades de ejercicio. Consideramos este test novel con una utilidad potencial muy alta en las líneas de trabajo de la actividad física y ciencias del deporte.

Cabe destacar que en la validación del test propuesto hemos encontrado aplicaciones de este que pueden ser destacadas:

-Tras ejercitarse al 80%FC_{max}, los datos son más consistentes.

-Aquellos parámetros a largo plazo confieren mayor claridad a la hora de analizar la RFC que los relativos a un tiempo <1minuto.

-T30 es el parámetro a corto plazo (<1minuto) que mayor consistencia presenta en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achten, J. y A. E. Jeukendrup (2003). "Heart rate monitoring". *Sports medicine* 33 (7): 517-538.

Al Haddad, H., P. Laursen, D. Chollet, S. Ahmaidi & M. Buchheit (2011). "Reliability of resting and postexercise heart rate measures". *International journal of sports medicine* 32 (8): 598.

Al Haddad, H., J. Parouty & M. Buchheit (2012). "Effect of daily cold water immersion on heart rate variability and subjective ratings of well-being in highly trained swimmers". *Int J Sports Physiol Perform* 7 (1): 33-38.

Arai, Y., J. P. Saul, P. Albrecht, L. H. Hartley, L. S. Lilly, R. J. Cohen y W. S. Colucci (1989). *Modulation of cardiac autonomic activity during and immediately after exercise*. American Journal of Physiology - Heart and Circulatory Physiology; Jan 1989, 256 (1) H132-H141

Araujo, C. (1985). Fast 'ON' and 'OFF' heart rate transients at different bicycle exercise levels". *International journal of sports medicine* (2): 68-73.

Arduini, A., M.-C. Gomez-Cabrera y M. Romagnoli (2011). "Reliability of different models to assess heart rate recovery after submaximal bicycle exercise". *Journal of Science and Medicine in Sport* (4): 352-357.

Arena, R. y L. P. Cahalin (2014). "Evaluation of cardiorespiratory fitness and respiratory muscle function in the obese population". *Progress in cardiovascular diseases* 56 (4): 457-464.

Åstrand, P., K. Rodahl, H. A. Dahl y S. B. STRØMME (2010). *Manual de fisiología del ejercicio*. México: Editorial Paidotribo.

Atkinson, G. y A. M. Nevill (1998). "Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine". *Sports medicine* 26 (4): 217-238.

Bangsbo, J., F. M. Iaia y P. Krstrup (2008). "The Yo-Yo intermittent recovery test". *Sports medicine* 38 (1): 37-51.

Barak, O. F., Z. B. Ovcin, D. G. Jakovljevic, Z. Lozanov-Crvenkovic, D. A. Brodie y N. G. Grujic (2011). "Heart rate recovery after submaximal exercise in four different recovery protocols in male athletes and non-

athletes". *Journal of sports science & medicine* **10** (2): 369.

Beneke, R., R. M. Leithauser y O. Ochentel (2011). "Blood lactate diagnostics in exercise testing and training". *Int J Sports Physiol Perform* **6** (1): 8-24.

Best, S. A., T. B. Bivens, M. D. Palmer, K. N. Boyd, M. M. Galbreath, Y. Okada, G. Carrick-Ranson, N. Fujimoto, S. Shibata y J. L. Hastings (2014). "Heart rate recovery after maximal exercise is blunted in hypertensive seniors". *Journal of Applied Physiology* **117** (11): 1302-1307.

Billat, V. L., R. Richard, V. M. Binsse, J. P. Koralsztein y P. Haouzi (1998). "The $\dot{V}O_2$ slow component for severe exercise depends on type of exercise and is not correlated with time to fatigue". *Journal of Applied Physiology* **85** (6): 2118-2124.

Blain, G., O. Meste y S. Bermon (2005). "Influences of breathing patterns on respiratory sinus arrhythmia in humans during exercise". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* **288** (2): H887-H895.

Blasco-Lafarga, C., I. Martínez-Navarro y M. Mateo-March (2013). "Is baseline cardiac autonomic

modulation related to performance and physiological responses following a supramaximal Judo test?". *PloS one* 8 (10): e78584.

Borresen, J. y M. I. Lambert (2007). "Changes in heart rate recovery in response to acute changes in training load". *European journal of applied physiology* 101 (4): 503-511.

Borresen, J. y M. I. Lambert (2008). "Autonomic control of heart rate during and after exercise". *Sports medicine* 38 (8): 633-646.

Borresen, J. y M. I. Lambert (2009). "The quantification of training load, the training response and the effect on performance". *Sports Medicine* 39 (9): 779-795.

Bosquet, L., F.-X. Gamelin y S. Berthoin (2007). "Is aerobic endurance a determinant of cardiac autonomic regulation?". *European journal of applied physiology* 100 (3): 363-369.

Bosquet, L., F. Gamelin y S. Berthoin (2008). "Reliability of postexercise heart rate recovery". *International journal of sports medicine* 29 (3): 238-243.

Bouchard, C. y T. Rankinen (2001). "Individual differences in response to regular physical activity".

Medicine and science in sports and exercise 33 (6 Suppl): S446-451; discussion S452-443.

Brink, M., C. Visscher, A. Coutts y K. Lemmink (2012). "Changes in perceived stress and recovery in overreached young elite soccer players". *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 22 (2): 285-292.

Brink, M. S., C. Visscher, S. L. Schmikli, E. Nederhof y K. A. Lemmink (2013). "Is an elevated submaximal heart rate associated with psychomotor slowness in young elite soccer players?". *European Journal of Sport Science* 13 (2): 207-214.

Brown, S. y J. Brown (2007). "Resting and postexercise cardiac autonomic control in trained masters athletes". *The Journal of Physiological Sciences* 57 (1): 23-29.

Buchheit, M., H. Al Haddad, A. Mendez-Villanueva, M. J. Quod y P. C. Bourdon (2011). "Effect of maturation on hemodynamic and autonomic control recovery following maximal running exercise in highly trained young soccer players". *Frontiers in Physiol* 2: 69.

Buchheit, M., A. Chivot, J. Parouty, D. Mercier, H. Al Haddad, P. Laursen y S. Ahmaidi (2010). "Monitoring endurance running performance using cardiac

parasympathetic function". *European journal of applied physiology* 108 (6): 1153-1167.

Buchheit, M. y C. Gindre (2006). "Cardiac parasympathetic regulation: respective associations with cardiorespiratory fitness and training load". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 291 (1): H451-H458.

Buchheit, M., P. Laursen, H. Al Haddad y S. Ahmaidi (2009). "Exercise-induced plasma volume expansion and post-exercise parasympathetic reactivation". *European journal of applied physiology* 105 (3): 471-481.

Buchheit, M. y P. B. Laursen (2013). "High-intensity interval training, solutions to the programming puzzle". *Sports medicine* 43 (5): 313-338.

Buchheit, M., P. B. Laursen y S. Ahmaidi (2007). "Parasympathetic reactivation after repeated sprint exercise". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 293 (1): H133-H141.

Buchheit, M. y A. Mendez-Villanueva (2010). "Improbable effect of carbohydrate diet on cardiac autonomic modulation during exercise". *European journal of applied physiology* 109 (3): 571-574.

Buchheit, M., A. Mendez-Villanueva, M. J. Quod, N. Poulos y P. Bourdon (2010). "Determinants of the variability of heart rate measures during a competitive period in young soccer players". *European journal of applied physiology* 109 (5): 869-878.

Buchheit, M., G. Millet, A. Parisy, S. Pourchez, P. Laursen y S. Ahmaidi (2008). "Supramaximal training and postexercise parasympathetic reactivation in adolescents". *Medicine & Science in Sports & Exercise* 40 (2): 362.

Buchheit, M., Y. Papelier, P. B. Laursen y S. Ahmaidi (2007). "Noninvasive assessment of cardiac parasympathetic function: postexercise heart rate recovery or heart rate variability?". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 293 (1): H8-H10.

Buchheit, M. y A. Rabbani (2014). "The 30-15 intermittent fitness test versus the yo-yo intermittent recovery test level 1: relationship and sensitivity to training". *International Journal of Sports Physiology & Performance* 9 (3).

Buchheit, M., S. Racinais, J. Bilsborough, P. Bourdon, S. Voss, J. Hocking, J. Cordy, A. Mendez-

Villanueva y A. Coutts (2013). "Monitoring fitness, fatigue and running performance during a pre-season training camp in elite football players". *Journal of Science and Medicine in Sport* 16 (6): 550-555.

Buchheit, M., C. Simon, F. Piquard, J. Ehrhart y G. Brandenberger (2004). "Effects of increased training load on vagal-related indexes of heart rate variability: a novel sleep approach". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 287 (6): H2813-H2818.

Buchheit, M., B. M. Simpson, L. A. Garvican-Lewis, K. Hammond, M. Kley, W. F. Schmidt, R. J. Aughey, R. Soria, C. Sargent y G. D. Roach (2013). "Wellness, fatigue and physical performance acclimatisation to a 2-week soccer camp at 3600 m (ISA3600)". *British journal of sports medicine* 47 (Suppl 1): i100-i106.

Buchheit, M., B. M. Simpson, W. F. Schmidt, R. J. Aughey, R. Soria, R. A. Hunt, L. A. Garvican-Lewis, D. B. Pyne, C. J. Gore y P. C. Bourdon (2013). "Predicting sickness during a 2-week soccer camp at 3600 m (ISA3600)". *British journal of sports medicine* 47 (Suppl 1): i124-i127.

Buchheit, M., M. Simpson, H. Al Haddad, P. Bourdon y A. Mendez-Villanueva (2012). "Monitoring changes in physical performance with heart rate measures in young soccer players". *European journal of applied physiology* 112 (2): 711-723.

Camm, A., M. Malik, J. Bigger, G. Breithardt, S. Cerutti, R. Cohen, P. Coumel, E. Fallen, H. Kennedy y R. Kleiger (1996). "Heart rate variability: standards of measurement, physiological interpretation and clinical use. Task Force of the European Society of Cardiology and the North American Society of Pacing and Electrophysiology". *Circulation* 93 (5): 1043-1065.

Carnethon, M. R., Jacobs, S. Sidney, B. Sternfeld, S. S. Gidding, C. Shoushtari & K. Liu (2005). "A Longitudinal Study of Physical Activity and Heart Rate Recovery: Cardia, 1987–1993". *Medicine & Science in Sports & Exercise* 37 (4): 606-612.

Carnethon, M. R., B. Sternfeld, K. Liu, D. R. J. Jacobs JR, P. J. Schreiner, O. D. Williams, C. E. Lewis y S. Sidney (2012). "Correlates of Heart Rate Recovery over 20 Years in a Healthy Population Sample". *Medicine & Science in Sports & Exercise* 44 (2): 273-279.

Casey, D. P. y M. J. Joyner (2011). "Local control of skeletal muscle blood flow during exercise: influence of available oxygen". *Journal of applied physiology* 111 (6): 1527-1538.

Cerretelli, P. y P. Di Prampero (1971). "Kinetics of respiratory gas exchange and cardiac output at the onset of exercise". *Scandinavian journal of respiratory diseases. Supplementum 77*: 35a.

Cole, C. R., E. H. Blackstone, F. J. Pashkow, C. E. Snader y M. S. Lauer (1999). "Heart-Rate Recovery Immediately after Exercise as a Predictor of Mortality". *New England Journal of Medicine* 341 (18): 1351-1357.

Cole, C. R., J. M. Foody, E. H. Blackstone y M. S. Lauer (2000). "Heart rate recovery after submaximal exercise testing as a predictor of mortality in a cardiovascularly healthy cohort". *Annals of internal medicine* 132 (7): 552-555.

Coleman, R., S. Wilkie, L. Viscio, S. O'llanley, J. Porcari, G. Kline, B. Keller, S. Hsieh, P. Freedson y J. Rippe (1987). "171: Validation of 1-mile walk test for estimating vo2max in 20-29 year olds". *Medicine & Science in Sports & Exercise* 19 (2): S29.

Conconi, F., M. Ferrari, P. G. Ziglio, P. Droghetti y L. Codeca (1982). "Determination of the anaerobic threshold by a noninvasive field test in runners". *Journal of Applied Physiology* 52 (4): 869-873.

Conconi, F., G. Grazi, I. Casoni, C. Guglielmini, C. Borsetto, E. Ballarin, G. Mazzoni, M. Patracchini y F. Manfredini (1996). "The Conconi test: methodology after 12 years of application". *International journal of sports medicine* 17 (7): 509-519.

Cooper, K. H. (1968). "A means of assessing maximal oxygen intake: correlation between field and treadmill testing". *Jama* 203 (3): 201-204.

Cormack, S. J., R. U. Newton y M. R. McGuigan (2008). "Neuromuscular and endocrine responses of elite players to an Australian rules football match". *Int J Sports Physiol Perform* 3 (3): 359-374.

Correia, L. C. L., M. Noya-Rabelo y J. A. Barreto-Filho (2014). "Revascularização Miocárdica Guiada por Isquemia: o Reflexo Oculoisquêmico". *Arquivos Brasileiros de Cardiologia* 102: e40-.

Coyle, E., W. Martin, A. Ehsani, J. Hagberg, S. Bloomfield, D. Sinacore y J. Holloszy (1983). "Blood lactate threshold in some well-trained ischemic heart

disease patients". *Journal of Applied Physiology* 54 (1): 18-23.

Chicharro, J. L. y A. F. Vaquero (2006). *Fisiología del ejercicio/Physiology of Exercise*. Ed. Médica Panamericana.

Daanen, H. A., R. P. Lamberts, V. L. Kallen, A. Jin y N. L. Van Meeteren (2012). *A systematic review on heart-rate recovery to monitor changes in training status in athletes*.

Danieli, A., L. Lusa, N. Potočnik, B. Meglič, A. Grad y F. F. Bajrović (2014). "Resting heart rate variability and heart rate recovery after submaximal exercise". *Clinical Autonomic Research* 24 (2): 53-61.

Darr, K. C., D. R. Bassett, B. J. Morgan y D. P. Thomas (1988). "Effects of age and training status on heart rate recovery after peak exercise". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 254 (2): H340-H343.

Davis, D. (2007). *Interpretación del ECG: su dominio rápido y exacto*. Ed. Médica Panamericana.

Dhoble, A., B. D. Lahr, T. G. Allison y S. L. Kopecky (2014). "Cardiopulmonary Fitness and Heart Rate Recovery as Predictors of Mortality in a Referral

Population". *Journal of the American Heart Association: Cardiovascular and Cerebrovascular Disease* 3 (2): e000559.

Dixon, E. M., M. V. Kamath, N. McCartney y E. L. Fallen (1992). "Neural regulation of heart rate variability in endurance athletes and sedentary controls". *Cardiovascular research* 26 (7): 713-719.

Du, N., S. Bai, K. Oguri, Y. Kato, I. Matsumoto, H. Kawase y T. Matsuoka (2005). "Heart rate recovery after exercise and neural regulation of heart rate variability in 30-40 year old female marathon runners". *Journal of sports science & medicine* 4 (1): 9.

Dupuy, O., Mekary, S., Berryman, N., Bherer, L., Audiffren, M. y Bosquet, L. (2012). "Reliability of heart rate measures used to assess post-exercise parasympathetic reactivation". *Clinical Physiology and Functional Imaging* 32: 296–304.

Education, S. (2004). *Aplicación de la prueba Cooper, Course Navette y Test de Ruffier. Resultados y análisis estadístico en educación secundaria.*

Everitt, B. S. (1994). *Statistical methods for medical investigations.* Edward Arnold London.

Freeman, J. V., F. E. Dewey, D. M. Hadley, J. Myers y V. F. Froelicher (2006). "Autonomic nervous system interaction with the cardiovascular system during exercise". *Progress in cardiovascular diseases* 48 (5): 342-362.

García, A. R. (2004). "La intensidad del esfuerzo y la curva de recuperación en actividades aeróbicas beneficiosas para la salud". *Lecturas: Educación física y deportes* 71: 28.

Giallauria, F., D. Del Forno, F. Pilerci, A. De Lorenzo, A. Manakos, R. Lucci y C. Vigorito (2005). "Improvement of heart rate recovery after exercise training in older people". *Journal of the American Geriatrics Society* 53 (11): 2037-2038.

Gordon, J. L., B. Ditto y B. D'Antono (2012). "Cognitive depressive symptoms associated with delayed heart rate recovery following interpersonal stress in healthy men and women". *Psychophysiology* 49 (8): 1082-1089.

Goulopoulou, S., B. Fernhall y J. A. Kanaley (2009). "Hemodynamic responses and linear and non-linear dynamics of cardiovascular autonomic regulation

following supramaximal exercise". *European journal of applied physiology* 105 (4): 525-531.

Haff, G. y C. Dumke (2012). *Laboratory manual for exercise physiology*. Human Kinetics.

Haines, D. E. (2013). *Principios de neurociencia: aplicaciones básicas y clínicas*. Elsevier España.

Hautala, A. J., T. Rankinen, A. M. Kiviniemi, T. H. Mäkikallio, H. V. Huikuri, C. Bouchard y M. P. Tulppo (2006). "Heart rate recovery after maximal exercise is associated with acetylcholine receptor M2 (CHRM2) gene polymorphism". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 291 (1): H459-H466.

Heffernan, K. S., C. A. Fahs, K. K. Shinsako, S. Y. Jae y B. Fernhall (2007). "Heart rate recovery and heart rate complexity following resistance exercise training and detraining in young men". *American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology* 293 (5): H3180-H3186.

Hopkins, W. G. (2000). "Measures of reliability in sports medicine and science". *Sports medicine* 30 (1): 1-15.

Imai, K., H. Sato, M. Hori, H. Kusuoka, H. Ozaki, H. Yokoyama, H. Takeda, M. Inoue y T. Kamada (1994).

"Vagally mediated heart rate recovery after exercise is accelerated in athletes but blunted in patients with chronic heart failure". *Journal of the American College of Cardiology* 24 (6): 1529-1535.

Jae, S. Y., S. Kurl, J. A. Laukkanen, F. Zaccardi, Y.-H. Choi, B. Fernhall, M. Carnethon y B. A. Franklin (2016). "Exercise Heart Rate Reserve and Recovery as Predictors of Incident Type 2 Diabetes". *The American journal of medicine*.

Jensen, N., T. Camargo y D. Bergamaschi (2016). "Comparison of methods to measure body fat in 7-to-10-year-old children: a systematic review". *Public Health*.

Jette, M., K. Sidney y G. Blümchen (1990). "Metabolic equivalents (METs) in exercise testing, exercise prescription, and evaluation of functional capacity". *Clinical cardiology* 13 (8): 555-565.

Joyner, M. J., J. N. Barnes, E. C. Hart, B. G. Wallin y N. Charkoudian, N. (2014). "Neural Control of the Circulation: How Sex and Age Differences Interact in Humans". *Comprehensive Physiology* 5:193-215.

Kaikkonen, P., E. Hynynen, T. Mann, H. Rusko y A. Nummela (2012). "Heart rate variability is related to

training load variables in interval running exercises". *European journal of applied physiology* 112 (3): 829-838.

Kenney, W. L., J. Wilmore y D. Costill (1999). *Physiology of sport and exercise with web study guide*. Human kinetics.

Kilgour, R., P. Gariépy y R. Rehel (1993). "Cardiovascular responses during recovery from exercise and thermal stress". *Aviation, space, and environmental medicine* 64 (3 Pt 1): 224-229.

Kiviniemi, A., M. Tulppo, A. Hautala, E. Vanninen y A. Uusitalo (2014). "Altered relationship between R-R interval and R-R interval variability in endurance athletes with overtraining syndrome". *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 24 (2): e77-e85.

Kligfield, P., A. McCormick, A. Chai, A. Jacobson, P. Feuerstadt y S. C. Hao (2003). "Effect of age and gender on heart rate recovery after submaximal exercise during cardiac rehabilitation in patients with angina pectoris, recent acute myocardial infarction, or coronary bypass surgery". *The American journal of cardiology* 92 (5): 600-603.

Lachin, J. M. (2004). "The role of measurement reliability in clinical trials". *Clinical trials* 1 (6): 553-566.

Ladell, W. (1951). "Assessment of group acclimatization to heat and humidity". *The Journal of physiology* 115 (3): 296.

Lahiri, M. K., P. J. Kannankeril y J. J. Goldberger (2008). "Assessment of autonomic function in cardiovascular disease: physiological basis and prognostic implications". *Journal of the American College of Cardiology* 51 (18): 1725-1733.

Lambert, M. & J. Borresen (2006). "A theoretical basis of monitoring fatigue: a practical approach for coaches". *International Journal of Sports Science and Coaching* 1 (4): 371-388.

Lamberts, R., S. Maskell, J. Borresen y M. Lambert (2011). "Adapting workload improves the measurement of heart rate recovery". *International journal of sports medicine* 32 (9): 698.

Lamberts, R., J. Swart, B. Capostagno, T. Noakes y M. Lambert (2010). "Heart rate recovery as a guide to monitor fatigue and predict changes in performance parameters". *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 20 (3): 449-457.

Lamberts, R. P. (2013). "Predicting cycling performance in trained to elite male and female cyclists". *Int. J. Sports Physiol. Perform.*

Lamberts, R. P., K. A. Lemmink, J. J. Durandt y M. I. Lambert (2004). "Variation in heart rate during submaximal exercise: implications for monitoring training". *The Journal of Strength & Conditioning Research* 18 (3): 641-645.

Lamberts, R. P., G. J. Rietjens, H. H. Tjink, T. D. Noakes y M. I. Lambert (2010). "Measuring submaximal performance parameters to monitor fatigue and predict cycling performance: a case study of a world-class cyclo-cross cyclist". *European journal of applied physiology* 108 (1): 183-190.

Lamberts, R. P., J. Swart, T. D. Noakes y M. I. Lambert (2009). "Changes in heart rate recovery after high-intensity training in well-trained cyclists". *European journal of applied physiology* 105 (5): 705-713.

Lamberts, R. P., J. Swart, T. D. Noakes y M. I. Lambert (2011). "A novel submaximal cycle test to monitor fatigue and predict cycling performance". *British journal of sports medicine* 45 (10): 797-804.

Lauer, M. S. (2011). "Heart rate recovery: what now?". *Journal of Internal Medicine* 270 (6): 597-599.

Laukkanen, R., P. Oja, M. Pasanen y I. Vuori (1992). "Validity of a two kilometre walking test for estimating maximal aerobic power in overweight adults". *International journal of obesity and related metabolic disorders: journal of the International Association for the Study of Obesity* 16 (4): 263-268.

Laursen, P. B. (2010). "Training for intense exercise performance: high-intensity or high-volume training?". *Scandinavian journal of medicine & science in sports* 20 (s2): 1-10.

Leger, L. A. y J. Lambert (1982). "A maximal multistage 20-m shuttle run test to predict \dot{V}O₂ max". *European journal of applied physiology and occupational physiology* 49 (1): 1-12.

Leicht, A. y G. Allen (2008). "Moderate-term reproducibility of heart rate variability during rest and light to moderate exercise in children". *Brazilian Journal of medical and biological research* 41 (7): 627-633.

Mann, T., C. Webster, R. Lamberts y M. Lambert (2014). "Effect of exercise intensity on post-exercise

oxygen consumption and heart rate recovery". *European Journal of Applied Physiology* 114 (9): 1809-1820.

Martinmäki, K. y H. Rusko (2008). "Time-frequency analysis of heart rate variability during immediate recovery from low and high intensity exercise". *European journal of applied physiology* 102 (3): 353-360.

McDonald, K. G., S. Grote y T. C. Shoepe (2014). "Effect of Training Mode on Post-Exercise Heart Rate Recovery of Trained Cyclists". *Journal of Human Kinetics* 41: 43-49.

Meeusen, R., M. Duclos, C. Foster, A. Fry, M. Gleeson, D. Nieman, J. Raglin, G. Rietjens, J. Steinacker y A. Urhausen (2013). "Prevention, diagnosis, and treatment of the overtraining syndrome: joint consensus statement of the European College of Sport Science and the American College of Sports Medicine". *Medicine and science in sports and exercise* 45 (1): 186-205.

Montero, F. J. C. y J. Calderón (2007). *Fisiología aplicada al deporte*. Editorial Tebar.

Morales, J., V. Garcia, X. García-Massó, P. Salvá, R. Escobar y B. Busca (2013). "The use of heart rate variability in assessing precompetitive stress in high-standard judo athletes". *Int J Sports Med* 34 (2): 144-151.

Niewiadomski, W., A. Gąsiorowska, B. Krauss, A. Mroz y G. Cybulski (2007). "Suppression of heart rate variability after supramaximal exertion". *Clinical physiology and functional imaging* 27 (5): 309-319.

Nishime, E. O., C. R. Cole, E. H. Blackstone, F. J. Pashkow y M. S. Lauer (2000). "Heart rate recovery and treadmill exercise score as predictors of mortality in patients referred for exercise ECG". *Jama* 284 (11): 1392-1398.

Nussinovitch, U., K. P. Elishkevitz, K. Kaminer, M. Nussinovitch, S. Segev, B. Volovitz y N. Nussinovitch (2011). "The Efficiency of 10-Second Resting Heart Rate for the Evaluation of Short-Term Heart Rate Variability Indices". *Pacing and Clinical Electrophysiology* 34 (11): 1498-1502.

Oliveira, T. P., R. Alvarenga Mattos, R. B. F. Silva, R. A. Rezende y J. R. P. Lima (2013). "Absence of parasympathetic reactivation after maximal exercise". *Clinical physiology and functional imaging* 33 (2): 143-149.

Olmo, M., Nave, R. (2015). Hyperphysics.
Universidad Estatal de Georgia: Departamento de Física

y *Astronomia*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hph.html>

Otsuki, T., S. Maeda, M. Iemitsu, Y. Saito, Y. Tanimura, J. Sugawara, R. Ajisaka y T. Miyauchi (2007). "Postexercise heart rate recovery accelerates in strength-trained athletes". *Medicine and science in sports and exercise* 39 (2): 365-370.

Parouty, J., H. Al Haddad, M. Quod, P. M. Leprêtre, S. Ahmaidi y M. Buchheit (2010). "Effect of cold water immersion on 100-m sprint performance in well-trained swimmers". *European journal of applied physiology* 109 (3): 483-490.

Patel, V., C. H. Critoph, M. C. Finlay, B. Mist, P. D. Lambiase y P. M. Elliott (2014). "Heart Rate Recovery in Patients With Hypertrophic Cardiomyopathy". *The American Journal of Cardiology* 113 (6): 1011-1017.

Pereyra, C. (2014). "Clasificación funcional del SN". *Biología-Sistema Nervioso: Blogspot*. <http://abccrp.blogspot.com.es/>

Perini, R., C. Orizio, A. Comandè, M. Castellano, M. Beschi y A. Veicsteinas (1989). "Plasma norepinephrine and heart rate dynamics during recovery from submaximal exercise in man". *European journal of*

applied physiology and occupational physiology 58 (8): 879-883.

Perini, R., C. Orizio, A. Gamba y A. Veicsteinas (1993). "Kinetics of heart rate and catecholamines during exercise in humans". *European journal of applied physiology and occupational physiology* 66 (6): 500-506.

Pierpont, G. L., S. Adabag y D. Yannopoulos (2013). "Pathophysiology of exercise heart rate recovery: a comprehensive analysis". *Annals of Noninvasive Electrocardiology* 18 (2): 107-117.

Pierpont, G. L., D. R. Stolpman y C. C. Gornick (2000). "Heart rate recovery post-exercise as an index of parasympathetic activity". *Journal of the autonomic nervous system* 80 (3): 169-174.

Pierpont, G. L. y E. J. Voth (2004). "Assessing autonomic function by analysis of heart rate recovery from exercise in healthy subjects". *The American journal of cardiology* 94 (1): 64-68.

Plews, D. J., P. B. Laursen, A. E. Kilding y M. Buchheit (2013). "Evaluating training adaptation with heart rate measures: a methodological comparison". *Int J Sports Physiol Perform* 8 (6): 688-691.

Raczak, G., G. D. Pinna, M. T. La Rovere, R. Maestri, L. Danilowicz-Szymanowicz, W. Ratkowski, M. Figura-Chmielewska, M. Szwoch y K. Ambroch-Dorniak (2005). "Cardiovagal response to acute mild exercise in young healthy subjects". *Circulation Journal* 69 (8): 976-980.

Ribeiro, J. P., J. M. Ibáñez y R. Stein (1991). "Autonomic nervous control of the heart rate response to dynamic incremental exercise: evaluation of the Rosenblueth-Simeone model". *European journal of applied physiology and occupational physiology* 62 (2): 140-144.

Ricardo, D. R., M. B. de Almeida, B. A. Franklin y C. G. S. Araujo (2005). "Initial and final exercise heart rate transients: influence of gender, aerobic fitness, and clinical status". *CHEST Journal* 127 (1): 318-327.

Riera, A. R. P. (2015). "Arritmias en el atleta". *Facultad de Medicina de la ABC: Biblioteca*.
<http://www.fac.org.ar/edicion/cardej/pdf/cap06.pdf>

Rodríguez Cabrero, M., A. García Aparicio, T. García Pastor, J. Salinero y P. Gonzá (2015). "Actividad física y ocio y su relación con el índice de Ruffier en adolescentes/Physical Activity And Leisure Habits And

Relation With Ruffier Index In Adolescents pp. 165-180".
Revista Internacional de Medicina y Ciencias de la Actividad Física y el Deporte (57).

Rodriguez, F. A., A. Valenzuela, N. Gusi, S. Nacher y I. Gallardo (1998). *Valoración de la condición física saludable en adultos (y 11): fiabilidad, aplicabilidad y valores normativos de la batería AFISAL-INEFC*.

Rowell, L. B. y D. S. O'Leary (1990). "Reflex control of the circulation during exercise: chemoreflexes and mechanoreflexes". *Journal of Applied Physiology* 69 (2): 407-418.

Rowell, G. J., A. J. Coutts, P. Reaburn S. Hill-Haas (2009). "Effects of cold-water immersion on physical performance between successive matches in high-performance junior male soccer players". *Journal of sports sciences* 27 (6): 565-573.

Schneider, R., P. Barthel y M. Watanabe (2004). "Heart rate turbulence on Holter". *Dynamic electrocardiography*: 190-193.

Schünke, M. (2006). *Prometheus*, tomo 3. Panamericana.

Schwartz, P. (1998). "The autonomic nervous system and sudden death". *European heart journal* 19: F72-80.

Segui, M. (2015). "La potenza aerobica". My personal trainer: Fisiologia del l´allenamento.
<http://www.my-personaltrainer.it/VO2MAX2.html>

Sherwood, L. (2015). *Human physiology: from cells to systems*. Cengage learning.

Stanley, J., J. M. Peake y M. Buchheit (2013). "Cardiac parasympathetic reactivation following exercise: implications for training prescription". *Sports medicine* 43 (12): 1259-1277.

Sugawara, J., H. Murakami, S. Maeda, S. Kuno y M. Matsuda (2001). "Change in post-exercise vagal reactivation with exercise training and detraining in young men". *European journal of applied physiology* 85 (3-4): 259-263.

Sun, P., H. Yan, S. M. Ranadive, A. D. Lane, R. M. Kappus, K. Bunsawat, T. Baynard, M. Hu, S. Li y B. Fernhall (2016). "Autonomic Recovery Is Delayed in Chinese Compared with Caucasian following Treadmill Exercise". *PloS one* 11 (1).

Taha, B., P. Simon, J. Dempsey, J. Skatrud y C. Iber (1995). "Respiratory sinus arrhythmia in humans: an obligatory role for vagal feedback from the lungs". *Journal of Applied Physiology* 78 (2): 638-645.

Tanaka, H., K. D. Monahan y D. R. Seals (2001). "Age-predicted maximal heart rate revisited". *J Am Coll Cardiol* 37 (1): 153-156.

Thomas, V., F. Costes, M. Chatagnon, J.-P. Pouilly y T. Busso (2008). "A comparison of lactate indices during ramp exercise using modelling techniques and conventional methods". *Journal of sports sciences* 26 (13): 1387-1395.

Tiukinhoy, S., N. Beohar y M. Hsie (2003). "Improvement in heart rate recovery after cardiac rehabilitation". *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention* 23 (2): 84-87.

Trevizani, G. A., P. R. Benchimol-Barbosa y J. Nadal (2012). "Efeitos da idade e da aptidão aeróbica na recuperação da frequência cardíaca em homens adultos". *Arquivos Brasileiros de Cardiologia* 99: 802-810.

Twist, C. y J. Highton (2013). "Monitoring fatigue and recovery in rugby league players". *Int J Sports Physiol Perform* 8 (5): 467-474.

Urhausen, A., H. Gabriel y W. Kindermann (1995). "Blood hormones as markers of training stress and overtraining". *Sports medicine* 20 (4): 251-276.

Vianna, J. M., F. Z. Werneck, E. F. Coelho, V. O. Damasceno y V. M. Reis (2014). "Oxygen Uptake and Heart Rate Kinetics after Different Types of Resistance Exercise". *Journal of Human Kinetics* 42: 235-244.

Warner, M. R. (1995). "Time-course and frequency dependence of sympathetic stimulation-evoked inhibition of vagal effects at the sinus node". *Journal of the autonomic nervous system* 52 (1): 23-33.

Wasserman, K., J. E. Hansen, D. Y. Sue, B. J. Whipp y V. F. Froelicher (1987). "Principles of exercise testing and interpretation". *Journal of Cardiopulmonary Rehabilitation and Prevention* 7 (4): 189.

Weir, J. P. (2005). "Quantifying test-retest reliability using the intraclass correlation coefficient and the SEM". *The Journal of Strength & Conditioning Research* 19 (1): 231-240.

Wilmore, J. H. y D. L. Costill (2004). *Fisiología del esfuerzo y del deporte*. Editorial Paidotribo.

Yamamoto, K., M. Miyachi, T. Saitoh, A. Yoshioka y S. Onodera (2001). "Effects of endurance training on resting and post-exercise cardiac autonomic control". *Medicine and Science in Sports and Exercise* 33 (9): 1496-1502.

Yawn, B. P., K. A. Ammar, R. Thomas y P. C. Wollan (2003). "Test-retest reproducibility of heart rate recovery after treadmill exercise". *The Annals of Family Medicine* 1 (4): 236-241.

Yilmaz, A., A. Erdem, Z. Kucukdurmaz, H. Karapinar, I. Gul, S. Sarikaya y R. Dizman (2013). "Abnormal heart rate recovery in stable heart failure patients". *Pacing and Clinical Electrophysiology* 36 (5): 591-595.

Zintl, F. (1991). *Entrenamiento de la resistencia*. Barcelona: Martínez Roca: 225.